

**Untersuchungen zur Lagerungsdichte bei der  
Futterkonservierung in Folienschläuchen**

**Inaugural-Dissertation**

zur

Erlangung des Grades

**Doktor der Agrarwissenschaften**

**(Dr. agr.)**

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am

25. August 2009

von

Dipl.-Ing. agr. Gerd-Christian Maack

aus

Köln

Referent: Prof. Dr. W. Büscher

Korreferent: Prof. Dr. K.-H. Südekum

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2009

Copyright 2010

Im Selbstverlag

Gerd-Christian Maack

Institut für Landtechnik

Verfahrenstechnik in der tierischen Erzeugung

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn

[http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss\\_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online) elektronisch publiziert.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks, sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

## **Kurzfassung**

Die Futterkonservierung im Folienschlauch ist eine Alternative zur Flach- und Hochsilotechnik entwickeltes Verfahren, das seit seiner Erfindung vor 40 Jahren weiterentwickelt und dadurch auch hinsichtlich der Einlagerungsleistung erheblich verbessert wurde. Im Sinne der Sicherung der Futterqualität und der Minimierung der während der Siloentnahme durch aeroben Stoffumsatz verursachten Verluste ist auch bei diesem Verfahren die Siliergutverdichtung von bedeutendem Einfluss.

Ziel der Arbeit war zunächst eine Analyse der im Praxiseinsatz erzielten Lagerungsdichten und eine Einordnung der Ergebnisse auf Basis von im Labor durchgeführten Messreihen zur Porosität von Maissilage in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und TS-Gehalt. Anschließend wurden Möglichkeiten zur Optimierung der Steuerung des Pressprozesses untersucht, da sich die manuelle Regelung des Pressdruckes durch den Maschinenbediener oft als kritischer Punkt im Hinblick auf die erzielte Gutverdichtung gezeigt hat. Für die erforderlichen Untersuchungen wurde eine spezielle Versuchsschlauchpresse konstruiert.

Die gemessene Lagerungsdichte in den untersuchten Siliergütern Mais, Gras, Luzerne, Lieschkolbenschrot und Pressschnitzeln lag auf vergleichbarem Niveau mit den in früheren Untersuchungen an Flachsilos festgestellten Dichten, wobei auch in Folienschläuchen gegenüber der Kernzone eine deutliche Abnahme der Lagerungsdichte von 20 bis 30 % zum oberen und seitlichen Rand der Anschnittflächen festgestellt wurde. Die Zunahme der TS-Dichte mit steigendem TS-Gehalt der Siliergüter ist insgesamt gering, jedoch abhängig vom Siliergut. Die erwünschte Konstanz der Porosität auf einem Niveau von  $< 40\%$  wird deshalb bei steigenden TS-Gehalten nicht erreicht. Somit ist für die Vermeidung von Nacherwärmung auch bei der Folienschlauchsilierung auf die Einhaltung der anzustrebenden TS-Gehalte zu achten.

Wie auch bei manueller Druckanpassung wird bei der zur Optimierung der Schlauchfüllung entwickelten automatisierten Pressdruckregelung die Schlauchdehnung als Regelgröße benutzt. Diese wird unter Verwendung von Abstandssensoren aus der sich ergebenden Schlauchhöhe und -breite errechnet und der Bremsdruck auf Basis von Sollwerten der Dehnung angepasst. Die ständige Kontrolle der Schlauchmaße und die zeitnahe Anpassung des Bremsdruckes ermöglicht die Verdichtung von Siliergut bei nahezu konstanter Schlauchdehnung und somit eine verbesserte Ausnutzung der beim Pressprozess möglichen Gutverdichtung.

## **Abstract**

The feed crop preservation in silo bags was developed as an alternative technique to clamp and tower silos in 1969. Since that time the operating technique has been improved in many ways resulting in increased performance. In order to preserve feed crop quality and minimize aerobic deterioration during feed out the bulk density is also of particular importance.

One objective in the project was to analyse the bulk density at bags pressed in practice. To evaluate the results in order to their porosity, measurements of chopped maize at controlled density and dry matter content were made.

Another item of the study was the development of technical opportunities to control the pressing process because the brake pressure adjustment by the machine operator has often been a critical point in regard to the crop compaction. To conduct the necessary experiments a special experimental bagger was constructed.

The detected bulk density of the investigated crops maize, grass, alfalfa, maize ear silage and sugar beet pulps is at a similar level as measured in former studies at clamp silos. Also, in case of silage bags the density in the centre of the silo face is about 20 to 30 % higher than at the flanks and the top. The increase of the dry matter density with rising dry matter content is altogether low, though it varies depending on silage crop. The necessary increase of DM-density to keep porosity at a low level of 40 % in case of rising DM-contents could not be observed. For this reason it is important to store the crops in bags at appropriate DM-content.

For improved bag filling an automatic brake pressure adjustment unit has been developed by using the experimental bagger. Similar to the manual working press pressure adjustment, the film extension during the press process is used as a control variable. The film extension is calculated by controlling height and width of the pressed bag and the brake pressure is adjusted according to defined reference values of film extension. The permanent control of the bag extension and the pressure adjustment by low delay gives the opportunity to compact crops under nearly constant bag extension. Therefore the maximum achievable crop compaction by the current system can be better utilised.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
<b>2 Literaturanalyse .....</b>	<b>3</b>
2.1 Futterkonservierung und Lagerung unter Luftabschluss.....	4
2.1.1 Konservierung im Hochsilo.....	4
2.1.2 Konservierung im Flachsilo.....	6
2.1.3 Ballensilage .....	8
2.1.4 Konservierung im Folienschlauch .....	10
2.2 Gärbiologische und gärtechnische Grundlagen.....	11
2.2.1 Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Siliereigenschaften.....	12
2.2.2 Silierverluste .....	17
2.2.3 Aerobe Stabilität und Nacherwärmung von Silagen .....	21
2.3 Technische Lösungen zur Verdichtung von Siliergütern.....	27
2.4 Verdichtungseigenschaften von Siliergütern .....	33
2.5 Dichtemessverfahren für Silage .....	36
2.5.1 Masse und Volumenbestimmung .....	37
2.5.2 Radiometrische Dichtemessung .....	40
2.5.3 Messung der Lagerungsdichte mit dem Spitzendrucksondierungsverfahren .....	43

2.6	Messung des Porenvolumens in Silage .....	45
2.7	Technische Entwicklung der Folienschlauchsilierung .....	50
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>57</b>
3.1	Dichtebestimmung an Schlauchsilagen .....	57
3.2	Messung der Porosität .....	60
3.2.1	Überprüfung der Messapparatur .....	62
3.2.2	Messung des Porenvolumens in Siliergut .....	64
3.3	Konstruktion und Funktionsweise der Versuchsschlauchpresse .....	65
3.4	Durchführung der Pressversuche und Untersuchungen am Siloschlauch .....	67
3.4.1	Siliergutverdichtung mit der Versuchsschlauchpresse .....	67
3.4.2	Mess- und Regeltechnik .....	69
3.4.3	Regelung des Bremsdruckes .....	71
3.4.4	Aufbau und Funktion einer Mess- und Regelsoftware .....	75
3.4.5	Möglichkeiten zur Umsetzung einer automatischen Bremsdruckregelung .....	78
3.5	Untersuchungen am Versuchsschlauch .....	79
3.5.1	Lagerungsdichte .....	79
3.5.2	Einfluss der Pressung auf die Partikelstruktur .....	81
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>83</b>
4.1	Lagerungsdichte in Siloschläuchen .....	83
4.1.1	Einfluss des TS-Gehaltes .....	83
4.1.2	Dichteverteilung über den Schlauchquerschnitt .....	86
4.2	Silageporosität in Abhängigkeit von Partikelstruktur, Lagerungsdichte und TS-Gehalt .....	91
4.2.1	Porosität in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und TS-Gehalt .....	93
4.2.2	Regressionsanalyse .....	95

4.2.3	Sollwerte der Lagerungsdichte in Abhängigkeit des TS-Gehaltes bei konstanter Porosität .....	96
4.3	Entwicklung eines Regelkreises zur Pressdrucksteuerung.....	97
4.4	Einfluss der Siliergutverdichtung auf die Partikelstruktur .....	102
4.4.1	Verteilung der Lagerungsdichte im Versuchsschlauch .....	103
4.4.2	Eindringwiderstand als Maß der Siliergutdichte .....	105
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>107</b>
5.1	Bewertung der Methode zur Dichtebestimmung .....	107
5.2	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf die Verdichtung .....	108
5.3	Lagerungsdichte über die Querschnittsfläche .....	109
5.4	Messung der Porosität in Silage .....	111
5.5	Entwicklung eines Regelkreises zur Pressdrucksteuerung.....	114
5.5.1	Wahl der Regelgröße .....	114
5.5.2	Regelung des Bremsdruckes.....	116
5.5.3	Einschätzung der Regelqualität .....	116
5.6	Auswirkung der Pressung auf die Partikelstruktur.....	118
5.7	Einfluss der Schlauchdehnung auf die Lagerungsdichte.....	119
5.8	Schlussfolgerungen und mögliche Optimierungsansätze für das Verfahren der Schlauchsilierung .....	121
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>124</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>136</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Schematische Darstellung eines nicht vollständig gasdichten Hochsilos (links) und eines vollständig gasdichten Hochsilos (rechts) (mod. nach DEDERER, 1988 und EICHORN, 1999).....	6
Abbildung 2:	Aufbau einer Siloabdeckung an der Schnittstelle zur Seitenwand (DLG e. V., 2006) .....	7
Abbildung 3:	Verdichtung von Anwelksilage (links) und Anschnittfläche während der Entnahme mit Greifschaukel und Blockschneider (rechts) (WAGNER, 2006) .....	8
Abbildung 4:	Skizze eines Rundballenwickelgerätes mit Ballen für den Dreipunktanbau am Schlepper (JUNGBLUTH et al., 2005) .....	9
Abbildung 5:	Prinzipskizze des Siloschlauchverfahrens (links) und Schlauchpresse während der Einlagerung (rechts) (mod. nach WAGNER, 2006).....	10
Abbildung 6:	Beziehung zwischen Trockensubstanzgehalt und Gärintensität bei Silomais (mod. nach AUERBACH, 2004) .....	14
Abbildung 7:	Gasfluss durch einen Probebehälter in Abhängigkeit von TS-Gehalt und Lagerungsdichte (Häckselgut Gras und Luzerne) (HONIG, 1987) .....	23
Abbildung 8:	Lagerungsdichte von Maissilage in 63 Flachsilos (Verdichtung mit Traktor oder Radlader) (mod. nach SPIEKERS et al., 2004).....	24
Abbildung 9:	Trockensubstanzdichte in Abhängigkeit der Überlagerungshöhe in Gras und Maissilagen (links) und eine nach Gleichung 2 auf einheitliche Überlagerungshöhe von 2,16 m korrigierte Trockensubstanzdichte (rechts) (n=175) (MUCK und HOLMES, 2000).....	26
Abbildung 10:	Beprobungspositionen an der Anschnittfläche der Siloschläuche (mod. nach MUCK und HOLMES, 2002) .....	27



Abbildung 11:	Einfluss der Radlast und des Kontakflächendruckes auf die Tiefenwirkung des Bodendruckes (SÖHNE, 1952).....	28
Abbildung 12:	Gliederung der Aufsammelpressen nach Wirk- und Funktionsprinzipien in der Landtechnik (JOHANNING, 2000).....	30
Abbildung 13:	Qualitativer Verlauf des Verdichtungsdrucke $p_K$ über dem Kolbenweg $s_K$ für die unterschiedlichen Verdichtungsprinzipien der Normaldruckverdichtung (WOLF-REGETT, 1989).....	31
Abbildung 14:	Arbeitsweise einer Rundballenpresse mit fester Kammergröße und Presswalzen (links); Presse mit einschwenkendem Ausleger (rechts) .....	32
Abbildung 15:	Ballenaufbau in einer Rundballenpresse mit variabler Presskammer .....	32
Abbildung 16:	Einfluss des Feuchtegehaltes auf die erreichbare mittlere Pressdichte bei unterschiedlichem Verdichtungsdruck für Wiesengras (SACHT, 1966) .....	34
Abbildung 17:	Verdichtungsfunktionen für Weidelgras mit unterschiedlichem Feuchtegehalt $U$ im gesamten Druckbereich (BÖNIG, 2006) .....	35
Abbildung 18:	Vergleich der gemessenen Lagerungsdichten des Pioneer Probenbohrers mit denen der Siloblockmethode (oben) und Korrekturtabelle für die Dichtewerte des Probenbohrers (unten) (THAYSEN, 2008a).....	38
Abbildung 19:	Rückstrahlsonde (Prinzipskizze) (PATZOLD et al., 2007) .....	40
Abbildung 20:	Radiometrischer Ballendichteprüfstand mit Quaderballen (links) und Rundballen (rechts) (DLG e.V., 2008).....	41
Abbildung 21:	Lateraler radiometrischer Scann der Ballenseite eines Strohballens (5*5 cm Rezeptur) (DLG e.V., 2008) .....	42
Abbildung 22:	Axialer radiometrischer Scann eines Strohballens (5*5 cm Rezeptur) aus variabler Presskammer (DLG e.V., 2008) .....	42
Abbildung 23:	Aufbau einer Spitzendrucksondierungseinrichtung mit vergrößert dargestellter Messsonde (mod. nach HESSE et al., 1978).....	43

Abbildung 24:	Zuordnung der Lagerungsdichte zum Eindringwiderstand für verschiedene Halmgüter (links) und Vergleich verschiedener Sondenspitzwinkel (rechts) (HESSE et al., 1978) .....	44
Abbildung 25:	Skizze der Messapparatur nach REES et al. (1983).....	46
Abbildung 26:	Kalibrierkurve der Messapparatur nach REES et al. (1983).....	48
Abbildung 27:	Zusammenhang zwischen Silagedichte und Porenvolumen (HÄBLER et al., 2008) .....	49
Abbildung 28:	Skizze eines Crimper-Baggers mit Darstellung der wesentlichen Baugruppen (mod. nach WAGNER, 2006) .....	53
Abbildung 29:	Zugfestigkeit einer Polyethylenfolie über den Dehnverlauf (schematische Darstellung) (MEISE, 2008) .....	54
Abbildung 30:	Probenehmer am Silo (links), gefüllter Bohrstock (Mitte) und Bohrstelle nach Probenahme (rechts).....	59
Abbildung 31:	Verteilung der Beprobungspositionen am Schlauchanschnitt.....	60
Abbildung 32:	Skizze des Versuchsaufbau zur Bestimmung des Porenvolumens .....	61
Abbildung 33:	Aufbau und Funktionselemente der Versuchsschlauchpresse .....	66
Abbildung 34:	Versuchsschlauchpresse mit Antriebsschlepper und Pressgutzuführung.....	68
Abbildung 35:	Versuchsschlauch bei kurzzeitiger Bremsdruckerhöhung .....	68
Abbildung 36:	Position der Abstandsmesssensoren am Schlauchumfang.....	70
Abbildung 37:	Schaltplan einer Bremsdruckregelung mit Druckerzeugung und Regelventil .....	72
Abbildung 38:	Aufbau der im Versuch eingesetzten Bremsdruckregeleinheit.....	73
Abbildung 39:	Programmmaske der Software zur Pressdruckregelung .....	76
Abbildung 40:	Unter Setup einzustellende Parameter zur automatischen Pressdruckregelung .....	77
Abbildung 41:	Presswirkung vom Tunnelende in die Schlauchtiefe .....	78

Abbildung 42:	Beprobungspositionen und geometrische Vermessung an den Schlauchanschnitten der drei Dehnstufen .....	80
Abbildung 43:	Penetrometer am Versuchsschlauch und Beprobungsposition der Dichtbestimmung im Eindringverlauf .....	82
Abbildung 44:	Arithmetisches Mittel der Frisch- und Trockensubstanzdichten der untersuchten Schlauchsilagen über dem TS-Gehalt ( $n = 10$ ).....	84
Abbildung 45:	Zuordnung der Messpositionen am Schlauchquerschnitt .....	87
Abbildung 46:	Spannbreite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt für Gras und Luzerne .....	88
Abbildung 47:	Spannbreite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) bei Pressschnittsilage in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt.....	89
Abbildung 48:	Spannbreite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt bei Mais und Lieschkolbenschrot.....	91
Abbildung 49:	Volumenanteil des Porenvolumen gegenüber dem Anteil von Festsubstanz plus Wasser über der Lagerungsdichte von Silomais (38 % TS) .....	92
Abbildung 50:	Porositätswerte von Maissilagen verschiedenen TS-Gehaltes über der Lagerungsdichte (kurze Häcksellänge).....	93
Abbildung 51:	Porositätswerte von Maissilagen verschiedenen TS-Gehaltes über der Lagerungsdichte (lange Häcksellänge) .....	94
Abbildung 52:	Verlauf der Lagerungsdichte bei zunehmendem TS-Gehalt unter Einhaltung einer konstanten Porosität für das Siliergut Mais .....	97
Abbildung 53:	Relativer Schlauchumfang, Bremsdruck und übertragene Bremskraft der Halteseile im Verlauf einer Versuchspressung mit zwei zusätzlichen Rampen (Pressgut Hobelspäne).....	98
Abbildung 54:	Versuchspressung ohne Zusatzwiderstand mit automatischer Bremsdruckanpassung von maximal 2 MPa pro Regelschritt (Mais) .....	100

Abbildung 55:	Foliendehnung und Bremsdruck über der Schlauchlänge bei Pressung ohne Bremsdruckanpassung (links) und mit automatischer Bremsdruckanpassung (rechts).....	101
Abbildung 56:	Versuchsschlauch mit Rampen ohne Pressdruckanpassung (links) und mit automatischer Pressdruckanpassung (rechts) .....	102
Abbildung 57:	Vergleich der Massenanteile in den Größenklassen von originalem Häckselgut und gepresstem Häckselgut (Mais 38 % TS, n = 10).....	103
Abbildung 58:	Frisch- und Trockensubstanzdichte der Versuchsschläuche mit zunehmender Schlauchdehnung aufgeteilt nach Messpositionen (Mais n = 3). .....	104
Abbildung 59:	Eindringwiderstand im Verlauf vertikaler Einstiche von oben in die Versuchsschläuche (Mais n = 10) und Lagerungsdichte in drei Höhen auf dem Einstichweg (n = 4) .....	106
Abbildung 60:	Lagerungsdichte über den Schlauchquerschnitt (Angabe in % relativ zur Kernzone).....	109
Abbildung 61:	Differenz der Überlagerungshöhe am Siloschlauch zwischen den oberen und unteren Messpositionen .....	110
Abbildung 62:	Trockensubstanzdichten von Maissilage in Abhängigkeit des TS-Gehaltes für Linien gleicher Porosität (gemessene Werte und unter Annahme konstanter Festsubstanzdichte berechnete Linien) .....	113
Abbildung 63:	Gasdurchfluss durch eine Maisprobe (35 % TS, 700 mm Höhe) bei einer Druckdifferenz von 0,3 Pa in Abhängigkeit der Lagerungsdichte (mod. nach HONIG, 1987).....	120

## Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb. A. 1:	Aufbau und Funktion der Versuchsschlauchpresse mit automatischer Bremsdruckregelung.....	135
Abb. A. 2:	Über Druckdifferenz bestimmte Porosität gegenüber der geometrisch gemessenen Porosität (n = 5).....	135

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergärbarkeitskenndaten verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999) .....	13
Tabelle 2:	Kritische pH-Werte für Silagen in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (WAGNER, 2006).....	15
Tabelle 3:	Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen und Silierschädlinge für die Silierung (mod. nach JEROCH et al., 1999).....	16
Tabelle 4:	Anforderungen an die Folienqualität von Fahrsilofolien und Folienschläuchen (nach MEISE et al., 2006).....	55
Tabelle 5:	Anzahl der beprobten Schlauchsilagen der jeweiligen Siliergüter .....	58
Tabelle 6:	TS-Gehalt und theoretische Häcksellänge der Silomaisproben .....	64
Tabelle 7:	Mittelwertvergleich der in Schlauchsilos verschiedener Silagen gemessenen Lagerungsdichten und deren jeweilige Abhängigkeit vom TS-Gehalt des Siliergutes.....	85
Tabelle 8:	Frischsubstanzdichte der verschiedenen Siliergüter unterteilt nach der Messposition.....	87
Tabelle 9:	Korrelation und Bestimmtheitsmaß der linearen Regression.....	95
Tabelle 10:	Koeffizienten des linearen Regressionsmodells.....	96
Tabelle 11:	Durchschnittliche Lagerungsdichte über den Schlauch- querschnitt in den Versuchsschläuchen der drei Dehnungsstufen .....	105

## Tabellenverzeichnis Anhang

Tab. A. 1:	Einfüllmassen für die Herstellung der definierten Dichtestufen.....	136
Tab. A. 2:	Maße und Gewichte der Versuchspresse .....	136
Tab. A. 3:	Kenngrößen der an der Versuchsmaschine eingesetzten Sensoren.....	137
Tab. A. 4:	Eckdaten des eingesetzten Penetrometers .....	137

**Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis**

$A_K$	Kolbenquerschnittsfläche
$A_S$	Anschnittfläche des Schlauches
$B$	Breite
$C_R$	Rollwiderstandskoeffizient
$D$	Federkonstante
$F_D$	Druckkraft
$F_H$	Hangabtriebskraft
$F_R$	Rollwiderstand
$F_S$	Haltekraft
$F_T$	Gesamtwiderstand
$H$	Höhe
$K$	Komprimierbarkeit
$L$	Länge
$L_S$	Länge des Schlauchabschnittes
$\Delta L$	Längenänderung der Druckfeder
$P$	Druck
$P_1$	Druck nach Druckausgleich
$P_B$	Bremsdruck
$TS_p$	Trockensubstanzgehalt der Probe
$U_s$	Umfang des Schlauches
$V_1$	Gesamtvolumen der Probe
$V_2$	Volumenausgleichsbehälter

---

$V_P$	Volumen der Probe
$V_P$	Porenvolumen der Probe
$V_S$	Volumen des Schlauchabschnittes
$V_{TS+W}$	Volumen von Wasser und Festsubstanz
$\cos$	Kosinus
$e$	eulersche Zahl
$g$	Gravitationskonstante
$k_U$	Korrekturfaktor Umfang
$m_E$	Masse der Schlauchpresseneinheit
$m_p$	Masse der Probe
$r$	Radius
$r_1$	Radius 1 der Ellipse
$r_2$	Radius 2 der Ellipse
$\sin$	Sinus
$z$	Abstand zur Silooberfläche (m)
$\pi$	Kreiszahl
$\eta$	Porosität
$\eta_P$	Porosität der Probe
$\rho_F$	Frischsubstanz-Lagerungsdichte
$\rho_{Fo}$	Frischsubstanz-Lagerungsdichte an Silooberfläche
$\rho_b$	Dichte der Probe
$\rho_{b0}$	Dichte der Probe bei Porosität von Null

$\rho_{FS}$	Frischsubstanzdichte
$\rho_{P(TS)}$	Lagerungsdichte der Probe (Trockensubstanz)
$\rho_{TS}$	Trockensubstanzdichte
$\rho_{(TS+W)}$	Dichte der Trockensubstanz und Wasser
$\rho_W$	Dichte des Wassers
$\alpha$	Signifikanzniveau
ÄT	Äußerer Totpunkt
B	Regressionskoeffizient
CCM	Corn-Cob-Mix
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxyd
Cs	Cäsium
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DMS	Dehnungsmessstreifen
FS	Frischsubstanz
F <sub>R</sub>	Radialkraft
GV	Gärverlust
H <sub>2</sub> O	Wasser
HBZ	Hauptbremszylinder
Hz	Hertz
h	Stunde
K	Kelvin
kPa	Kilopascal
kN	Kilonewton
kW	Kilowatt



---

LKS	Lieschkolbenschrot
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
MBq	Megabecquerel
MD	Massendifferenz
MPa	Megapascal
m	Masse
N	Stickstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
n	Anzahl der Wiederholung
Ø	Arithmetisches Mittel
P	Druck
Pa	Pascal
PK	Pufferkapazität
p <sub>K</sub>	Verdichtungsdruck am Presskolben
p <sub>Kmax</sub>	maximaler Kolbendruck
R	Korrelationskoeffizient
r	Radius
s	Standardabweichung
s <sub>k</sub>	Kolbenweg
T	Testgröße
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
U	Feuchtgehalt
UV	Ultraviolette Strahlung
Z	Zucker



## **1 Einleitung**

### **1.1 Einführung und Problemstellung**

Die zurzeit sehr niedrigen Milchauszahlungspreise setzen die Erzeuger unter einen erheblichen Kostendruck. Die schwierige Liquiditätslage vieler Betriebe und vor allem die unsichere Preisentwicklung vor dem Hintergrund der Diskussion um die Abschaffung der Quotenregelung erschwert Entscheidungen für langfristige Zukunftsinvestitionen in die Milchproduktion. Besonders die kaum mögliche Umnutzung von baulichen Anlagen birgt ein hohes Risiko. Andererseits stellt für viele Betriebe die Ausdehnung der Produktionskapazität mit zunehmender Spezialisierung eine Möglichkeit dar, die Produktionskosten zu senken und die langfristige Existenz zu sichern. Ein vorrangiges Ziel ist deshalb eine möglichst kapitalsparende Erweiterung des Produktionszweiges. Für den Bereich der Futterkonservierung bedeutet dies, dass eine Investition in feste Siloanlagen in vielen Fällen zu überdenken ist. Eine hohe Milchleistung ist jedoch nur mit qualitativ hochwertigem Grundfutter und einer einwandfreien Futterkonservierung zu realisieren.

Neben der Silierung in Flach- und Hochsilos haben die flexibler einsetzbaren Verfahren der Ballen- und Folienschlauchsilage in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Vor allem die einfache Anpassung an die aktuell einzusilierende Erntegutmenge bietet dem Landwirt bessere Planungsmöglichkeiten für die Futterkonservierung. Die Folienschlauchsilierung hat sich besonders für verderbempfindliche industrielle Koppelprodukte wie Zuckerrübenpressschnitzel und Treber sowie für hochwertige Konzentratfuttermittel (Feuchtmais, Feuchtgetreide) bewährt (WEBER, 2009 und MATTHIESEN, 2008).

Die Trockensubstanzverluste durch Nacherwärmung der Silage übersteigen in vielen Fällen bei weitem die unvermeidbaren Silierverluste und stellen somit neben den Qualitätseinbußen auch einen erheblichen, schwer zu kalkulierenden wirtschaftlichen Verlust dar. Gut vergorene Silagen mit hohen Energiegehalten, wie sie für eine leistungsorientierte Grundfuttermittellagerung anzustreben sind, neigen unabhängig vom Silierverfahren besonders zur Nacherwärmung. Neben der Einhaltung eines ausreichenden Entnahmevorschubes und dem Einsatz von Siliermitteln zur Verbesserung der aeroben Stabilität ist die Siliergutverdichtung der wichtigste Einflussfaktor zur Minimierung der durch Nacherwärmung verursachten Verluste.

Aufgrund der erheblichen Leistungssteigerung bei der Futterernte, sind die Einlagerung und Verdichtung zunehmend zum Problem in der gesamten Verfahrenskette geworden.

Deshalb wachsen die Ansprüche an die eingesetzte Verdichtungstechnik. Im Fall der Schlauchsilierung erfolgt die Verdichtung über die Zuführung des Substrates in einen Presstunnel mit anschließendem Folienschlauch. Der Pressdruck und damit die Verdichtungsintensität sind durch die Stärke der Anbremsung der Maschine gegen den gefüllten Schlauch manuell zu regulieren. Als Regelgröße wird hierbei die anhand von auf den Schlauch gedruckten Streifen gemessene Foliendehnung verwendet. Die Qualität dieser Arbeiten hängt bisher stark vom Management ab, also von der Erfahrung, der Aufmerksamkeit und vom Geschick der Bedienerperson.

## **1.2 Zielsetzung**

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojektes ist es, einen Beitrag zur Optimierung der Siliergutverdichtung im Folienschlauch zu leisten. Dabei werden die Erkenntnisse aus der Analyse des derzeitigen Standes der Technik für deren gezielte Weiterentwicklung genutzt.

Aus den Ergebnissen einer differenzierten Untersuchung der Lagerungsdichte der Siliergüter im Folienschlauch sowie der experimentellen Bestimmung der Porosität von Maissilage in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und Trockensubstanzgehalt sollen Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf eine gesteigerte Siliergutverdichtung entwickelt werden.

Einen weiteren Aspekt der Untersuchungen stellt die Verbesserung und Automatisierung der Maschinensteuerung dar, wodurch nicht nur die Siliergutverdichtung gesteigert, sondern auch der Maschinenbediener entlastet und dessen Einfluss auf das Arbeitsergebnis verringert werden soll. Zur Durchführung der Experimente wird eine spezielle Versuchsschlauchpresse konstruiert, mit deren Hilfe die geplanten Fragestellungen untersucht werden.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und der Entwicklung einer Methode zur Automatisierung der Pressdruckregelung sollen abschließend konkrete Verbesserungsmöglichkeiten für das Verfahren der Schlauchsilierung aufgezeigt werden.

## 2      **Literaturanalyse**

Zu Beginn des Kapitels werden die in der Praxis eingesetzten Verfahrenstechniken und die wesentlichen Einflussgrößen auf den Silierprozess beschrieben. Nachfolgend wird speziell auf die Verdichtbarkeit von Siliergütern, die Auswirkungen der Lagerungsdichte und der davon abhängigen Silageporosität auf den Silierprozess und die aerobe Stabilität eingegangen. Anschließend werden Messverfahren zur Bestimmung der Lagerungsdichte im Silo vorgestellt und deren Vor- und Nachteile erläutert. Auf die Entwicklung der Verfahrenstechnik der Schlauchsilierung wird abschließend gesondert eingegangen.

Verantwortlich für den Siliererfolg aber auch für den Verderb landwirtschaftlicher Güter sind unter Anwesenheit von Wasser ablaufende mikrobiologische Prozesse. Der Abbau durch Mikroorganismen und das Wachstum von Pilzen führen zu direkten Verlusten und einer erheblichen Qualitätsminderung (JUNGBLUTH et al., 2005): Dies gilt für Grobfutter und Körnerfrüchte gleichermaßen. Körnerfrüchte und Heu sind nur unter bestimmten Feuchtegehalten ohne Konservierungsmaßnahmen lagerfähig. Für Getreide, Körnermais und Heu liegt der maximale Feuchtegehalt bei 15 %, während Raps erst bei Feuchten unter 10 % lagerstabil bleibt. Werden die Körnerfrüchte mit einem höheren Feuchtegehalt geerntet, sind Maßnahmen zur Konservierung unumgänglich, um den durch die Aktivität von Mikroorganismen einsetzenden Verderb zu verhindern. Die Ernte von Getreide ist in den meisten Jahren und Anbauregionen bei ausreichend geringem Wassergehalt der Körner möglich. Die Ernte von Körnermais erfolgt jedoch in hiesigen Anbauregionen bei Erntegutfeuchten von 28 bis 40 %, was Maßnahmen zur Konservierung unbedingt erforderlich macht. Grobfutter (Gras und Silomais) wird bei noch wesentlich höheren Feuchtegehalten von 55 bis 75 % geerntet, wodurch eine Konservierung ohne Wasserentzug erheblich kostengünstiger wird.

Die Trocknung ist das für die Konservierung von Kornfrüchten am häufigsten angewendete Verfahren. Die Konservierung des Erntegutes wird dabei ausschließlich durch Wasserentzug erreicht, was einen hohen Energieeinsatz für die Verdampfung des im Erntegut gebundenen Wassers notwendig macht.

Die Stoffwechselaktivität der Pflanzen endet schon bei einem Wassergehalt von 35 %. Um aber einen Verderb, ausgelöst durch Mikroben, Schimmelpilze sowie chemische Reaktionen im Korn, wirkungsvoll zu verhindern, muss der Wassergehalt im Erntegut auf 12 bis 15 % reduziert werden (JEROCH et al., 1993).

Die Ansprüche an die Wasserverfügbarkeit der verderbauslösenden Mikroorganismen sind verschieden. Die Verfügbarkeit des Wassers wird durch die Wasseraktivität (Quotient aus Wasserdampfdruck eines Lagergutes und dem Dampfdruck des reinen Wassers) angegeben.

Bei der Lagerung von Körnerfrüchten kommt es zur Einstellung eines Feuchtegleichgewichts zwischen den Körnern und der Umgebungsluft im Stapel. Je höher die Kornfeuchte ist, desto höher ist auch die relative Feuchte der umgebenden Luft. Um einen Verderb sicher ausschließen zu können, muss das Erntegut so trocken sein, dass die Gleichgewichtsfeuchte der Umgebungsluft unter 65 % bei 20°C liegt. Um dem Erntegut Wasser zu entziehen, ist Luft mit einer relativen Luftfeuchte unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte für die Belüftung notwendig. Je größer die Differenz zwischen der Gleichgewichtsfeuchte und der relativen Luftfeuchte der Belüftungsluft ist, desto größer ist deren Trocknungsfähigkeit. Eine Erwärmung der Trocknungsluft senkt deren relative Feuchte und erhöht somit ihre Trocknungsfähigkeit. Die maximal mögliche Wasseraufnahme der Luft, bei Erreichen einer gleichen relativen Luftfeuchte, steigt mit zunehmender Temperatur (SCHÖN et al., 1998). Auf die Verfahrenstechnik der Trocknung soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden. Im Folgenden werden ausschließlich anaerobe Konservierungsverfahren behandelt.

## **2.1 Futterkonservierung und Lagerung unter Luftabschluss**

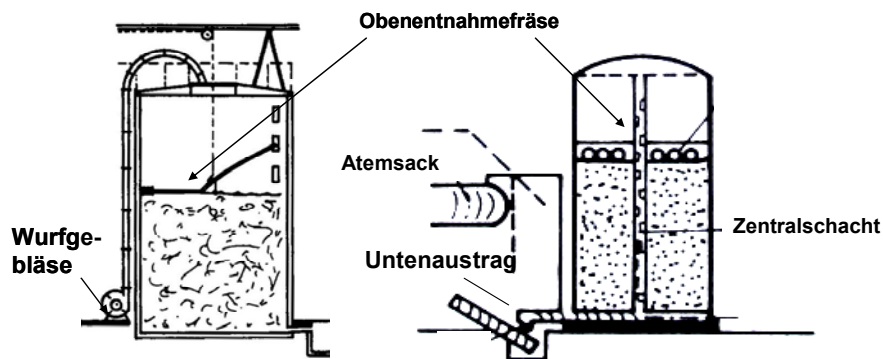
Hierbei ist grundsätzlich zwischen der vollständig gasdichten und der nur in der Silierphase gasdicht abgeschlossenen Lagerung zu unterscheiden. Bei ersterer wird unter Verwendung entsprechender Silo- und Entnahmetechnik der Luftzutritt verhindert, sodass die Silage auch nach Entnahmebeginn unter einer Kohlendioxid Atmosphäre steht. Bei der nicht vollständig gasdichten Lagerung ist das Silo nur bis zum Entnahmebeginn verschlossen, während die Entnahme unter Luftzutritt erfolgt (DEDERER, 1988). Nachfolgend werden die in der Praxis eingesetzten verfahrenstechnischen Lösungen kurz beschrieben.

### **2.1.1 Konservierung im Hochsilo**

Zur Einlagerung in gasdichte Silos werden heute fast ausschließlich Siloanlagen mit Obenentnahmefräse verwendet, da der Austrag mittels unten eingebauter Fräsen sich aufgrund deren Anfälligkeit und schlechten Zugänglichkeit nicht bewährt hat. Das Erntegut wird

mittels Wurfgebläse, Wurfhäcksler oder Schrägförderer von oben in das Silo eingebracht, wo es mit der Entnahmefräse gleichmäßig über die ganze Fläche verteilt und verfestigt werden kann. Das Verteilen ist zudem wichtig, um eine Entmischung des Siliergutes zu vermeiden. Unter dieser wird die ungleichmäßige Verteilung von groben und feinen Bestandteilen im Siloraum verstanden, die durch „Aufschwimmen“ von Bestandteilen geringerer Dichte im Schüttkegel zu begründen ist. Die Verdichtung erfolgt zusätzlich durch den Eigendruck der aufgelagerten Siliergutmasse. Die obere, nicht so stark verdichtete Schicht kann zusätzlich mit einem Siliermittel zur Verbesserung der aeroben Stabilität behandelt werden.

Das Silo wird nach der Befüllung verschlossen, was in Folge der Veratmung des Restsauerstoffs zu einer CO<sub>2</sub>-Atmosphäre mit minimalen Stoffumsätzen führt. Im Fall des vollständig gasdichten Hochsilos werden luftdruckbedingte Gasvolumenunterschiede mit einem Atemsack ausgeglichen, sodass kein zusätzlicher Luftsauerstoff ins Silo gelangt. Nach KREIPE (1975) und MATTHIESEN (2008) ist bei Siliergütern mit TS-Gehalten von mehr als 65 bis 70 % (z. B. Feuchtgetreide) von einer gasdichten Lagerung unter Kohlendioxydathmosphäre auszugehen. Grundfutterhäckselgut weist hingegen meist TS-Gehalte von 30 bis 50 % auf, sodass von einer Milchsäuregärung ausgegangen werden kann. Für die Entnahme wird die bei der Einlagerung benutzte Obenfräse in umgekehrter Drehrichtung eingesetzt. Die Silage wird im Fall des gasdichten Hochsilos in den Zentralschacht transportiert und fällt in diesem auf die im Siloboden eingebaute Austragschnecke, von der sie zur weiteren Verwendung aus dem Silo gefördert wird. Um die Gasdichtigkeit sicherzustellen, befindet sich an der Austragschnecke eine automatische Verschlussklappe. Beim nicht vollständig gasdichten Silo befördert die Entnahmefräse das Siliergut zu seitlichen Klappen im Silo. Vorteile des gasdichten Lagerungsverfahrens im Hochsilo liegen in der guten Futterqualität, den geringen Konservierungsverlusten sowie der arbeitssparenden Entnahmetechnik, die nahezu vollständig automatisierbar ist (DEDERER, 1988).



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung eines nicht vollständig gasdichten Hochsilos (links) und eines vollständig gasdichten Hochsilos (rechts) (mod. nach DEDERER, 1988 und EICHORN, 1999)

Die spezifischen Investitionskosten für eine Hochsiloplanlage hängen stark von der Gesamtgröße der Anlage sowie der technischen Ausstattung ab, wobei für ein vollständig gasdichtes Silo ca. 20 bis 25 % höhere Kosten zu kalkulieren sind. Im Vergleich zu den anderen Verfahren sind Konservierungskosten bei beiden Bauformen des Hochsilos jedoch erheblich höher, weshalb eine Neuinvestition in eine Hochsiloplanlage nur bei Betrieben mit begrenzten Platzverhältnissen oder bei Konservierung hochwertiger Siliergüter wie CCM in Frage kommt (SCHÖN et al., 1998 und KTBL, 2005).

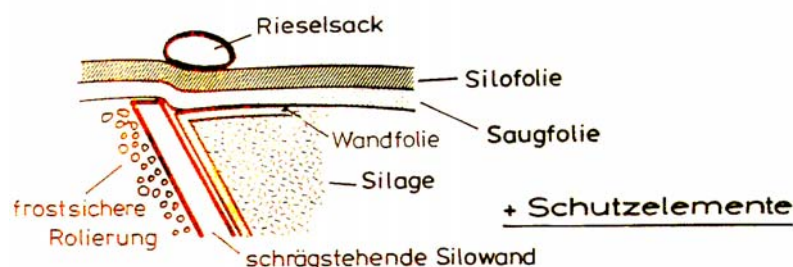
### 2.1.2 Konservierung im Flachsilo

Für die Konservierung von Mais- und Anwelksilage ist die Flachsilotechnik das am häufigsten angewendete Verfahren. Die im Vergleich zum Hochsilo niedrigen Verfahrenskosten und die in Verbindung mit entsprechender Befüll- und Verdichtungstechnik hohe Einlagerungsleistung besonders bei großen Erntemengen sind Vorteile des Verfahrens (SCHÖN et al., 1998). Für den Bau von Flachsiloanlagen sind flüssigkeitsdichte und säurefeste Bodenplatten vorgeschrieben. Zum Auffangen von Gärssaft und Regenwasser ist eine Grube vorzusehen. Die Siloseitenbegrenzungen können durch senkrechte, druckfeste Stahlbetonwände oder in Form von an einen Erdwall angelehnten Fertigbetonteilen (Traunsteiner Silo) ausgeführt sein. Das Siliergut kann mit Hilfe von Ladewagen oder beim Einsatz des Feldhäckslers auch mit anderen Transportfahrzeugen zum Fahrsilo transportiert und dort entweder während der Überfahrt in einer möglichst dünnen Schicht entleert oder nach Entladung des Fahrzeugs vor dem Silo auf dieses aufgeschoben werden. Zur Verdichtung wird das aufgebrachte Gut in maximal 30 cm starken Schichten mit



einem Schlepper, Radlader oder mit einem Vibrationsverdichter aus dem Straßenbau durch langsames Überfahren komprimiert. Dabei ist es wichtig, die gesamte Fläche möglichst gleichmäßig oft zu verdichten und durch ausgleichendes Verteilen konstante Schichtdicken zu erzielen (JUNGBLUTH et al., 2005). Beim Einsatz von Traktoren sollte auf Zwillingsbereifung verzichtet werden, der Reifeninnendruck auf mindestens 0,2 MPa eingestellt und der Schlepper zusätzlich ballastiert sein, um den Kontaktflächendruck zu erhöhen. Beim Verdichten von Freigärhaufen ohne Seitenwände ist allerdings der Einsatz von Zwillingsreifen aus Gründen der Standsicherheit beim Walzen am Rand kaum zu vermeiden. Vor Abschluss der Einlagerung ist darauf zu achten, dass die sich ergebende Oberfläche des Futterstocks, von der Mitte des Silos aus gesehen, in Quer- und in Längsrichtung zu den Wänden ein leichtes Gefälle aufweist, um Regenwasser vom Silo abzuleiten (DLG, 2006).

Wenn die Einlagerung beendet ist, sollte das Silo unverzüglich mit einer UV-beständigen Abdeckfolie abgedeckt werden, wobei das Aufbringen einer Unterziehfolie Vorteile beim Luftabschluss bringt, da sich diese direkt an das Siliergut anlegt. Die zuvor an den Seitenwänden angebrachte Folie kann nun nach innen geklappt und zusammen mit der Abdeckfolie mit Kiessäcken rundum beschwert werden.



**Abbildung 2: Aufbau einer Siloabdeckung an der Schnittstelle zur Seitenwand (DLG e. V., 2006)**

Damit die Folie eng auf dem Siliergut anliegt und keine Luft durch Folienbewegungen unter sie gelangt, ist die Folienoberfläche ganzflächig, beispielsweise mit Reifen, zu beschweren. Je nach Größe des Silos sind für das Abdecken mindestens drei bis sechs Arbeitskräfte erforderlich. Stark gestiegene Durchsatzleistungen im Feldhäckslereinsatz machen Einlagern und Verdichten auf vielen Betrieben zum „Engpass“ in der Verfahrenskette (SAVOIE et al., 2009). Deshalb ist gerade bei kleineren Fahrtilos die Parallelbefüllung von zwei Silos anzustreben, um eine ausreichende Verdichtungszeit zu gewährleisten.

Die Siliergutentnahme am Flachsiló kann mittels verschiedener mobiler Arbeitsgeräte erfolgen. Neben dem Einsatz von speziellen Siloblockschnidern kommen verbreitet Greif- und Schneidzangen als Frontlader- oder Radladeranbauvorsätze zum Einsatz (HOLMES und BOLSEN, 2009). Diese bieten besonders bei der Beschickung von Futtermischwagen und im Bezug auf die Arbeitsleistung deutliche Vorteile gegenüber dem Blockschneider. Vor allem die Entnahme mit Greifzangen hat jedoch den Nachteil, dass sie zu einer stärkeren Auflockerung der Anschnittfläche führt, was eine schnellere Nacherwärmung des Siliergutes zur Folge haben kann (WAGNER, 2005). Die Silobreite und -höhe darf nur so groß gewählt werden, dass mit der sich ergebenden Anschnittfläche in Kombination mit der täglichen Entnahmemenge ein Vorschub von 1-1,5 m pro Woche bzw. 2-2,5 m im Sommer nicht unterschritten wird (JUNGBLUTH et al., 2005).



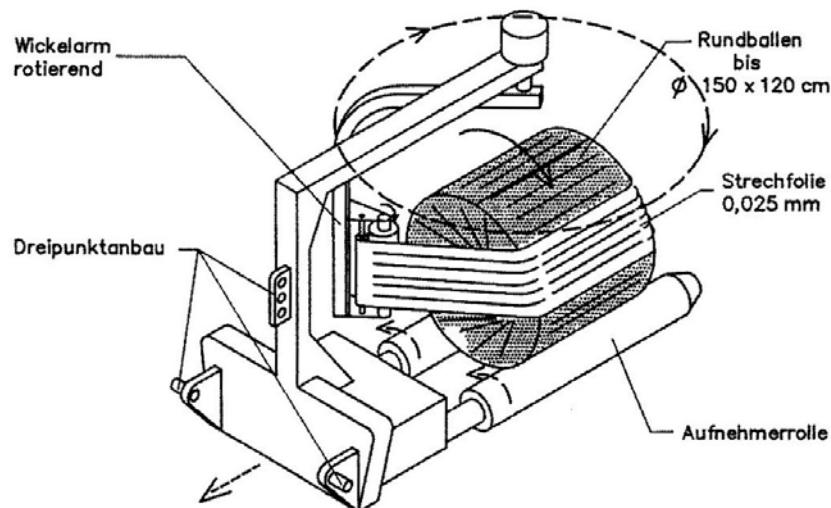
**Abbildung 3: Verdichtung von Anwelksilage (links) und Anschnittfläche während der Entnahme mit Greifschaukel und Blockschneider (rechts) (WAGNER, 2006)**

Probleme mit auftretendem Verderb durch Schimmelbefall und andere Mikroben resultieren in den meisten Fällen aus Luftzutritt und Wassereintrüchen infolge von Beschädigungen oder undichten Stellen am Rand des Silos. Um die Stabilität der Silage unter Lufteinfluss während der Entnahmephase zu verbessern, sollte besonders bei Maissilagen mit höheren TS-Gehalten ( $> 35\%$ ) ein Siliermittel zur Verbesserung der aeroben Stabilität eingesetzt werden (WYSS, 2000).

### **2.1.3 Ballensilage**

Die Silierung im Rund- und Quaderballen ist ein flexibel einsetzbares Verfahren für Halmgüter, das ohne spezielle bauliche Anlagen auskommt und durch die relativ kleinen Portionen mengenunabhängig eingesetzt werden kann. Der Vorteil der Transportfähigkeit der

geschlossenen Silageportionen macht diese zudem handelbar. Die mit einer Rund- oder Quaderballenpresse verdichteten Ballen werden mit einem speziellen Wickelgerät bis zu sechslagig mit einer hochwertigen Stretchfolie luftdicht verpackt.



**Abbildung 4:** Skizze eines Rundballenwickelgerätes mit Ballen für den Dreipunktbau am Schlepper (JUNGBLUTH et al., 2005)

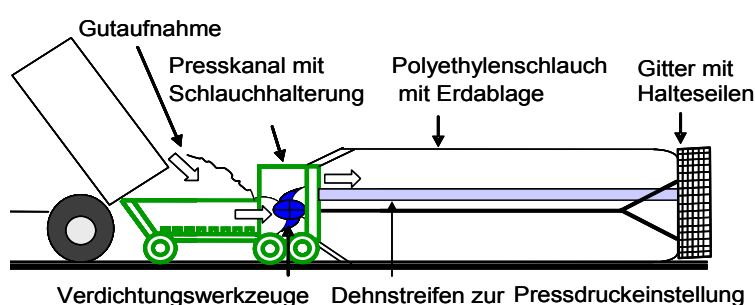
Da der Wickelvorgang direkt nach dem Pressen des Ballens erfolgen kann, ist die Befüllphase unter Luftereinfluss bei diesem Verfahren sehr kurz, wodurch eine Erwärmung des Siliergutes in Folge aerober Umsetzungsprozesse verhindert werden kann. Beim Einsatz einer Press-Wickelkombination kann Pressen und Verpacken von einer Person parallel bedient werden (THAYSEN, 2008b).

Probleme mit Haltbarkeit und Verderb treten meist nur durch Beschädigungen der Folie auf. Vom Siliergut selbst können besonders holzige Bestandteile zum Durchstoßen der Folie führen, doch häufiger treten Beschädigungen durch Vögel, Nagetiere, Transport oder Vandalismus auf, weshalb die Lagerung an einem geschützten Ort in Hofnähe der Lagerung am Feldrand vorzuziehen ist. Zum Umsetzen der Ballen ist eine spezielle Zange am Frontlader erforderlich, mit der diese aufgegriffen werden können ohne die Folie zu beschädigen. Aufgrund des hohen spezifischen Folienbedarfs und der im Vergleich zum Fahrsilo geringeren Verfahrensleistung ist der Silageballen besonders bei großen Erntemengen als relativ kostenintensiv anzusehen (AMMANN und FRICK, 2005).

### 2.1.4 Konservierung im Folienschlauch

Die Konservierung von Futter in Folienschläuchen stellt eine technische Alternative zum Fahrsilo dar, bei der das Siliergut analog zum Flachsiloverfahren als Schüttgut zum Einlagerungsort transportiert wird, wobei dieser flexibel gewählt werden kann. Ein befestigter Untergrund ist jedoch vor allem für die spätere Entnahme von Vorteil, aber nicht zwingend notwendig (STEINHÖFEL und WEBER, 2005). Das Verfahren ist sowohl für die Konservierung von Halmgut (Gras-Anwelkgut, Luzerne) als auch für Siliergüter kleiner Partikelgröße (Silomais, Pressschnitzel, Feuchtmais) geeignet.

Die Einlagerung und gleichzeitige Verdichtung des Siliergutes erfolgt mit einer Spezialmaschine, die entweder von einem Traktor angetrieben wird oder über einen aufgebauten Verbrennungsmotor verfügt (WOBSER, 1993). Je nach Maschinentyp und Siliergut können Durchsatzleistungen von 150 t/h erreicht werden, sodass das Verfahren auch in Häckslerernteketten einzusetzen ist (STEINHÖFEL, 2001). Das Siliergut kann direkt von rückwärts abladenden Transportfahrzeugen in den Aufnahmekunker der Maschine entleert werden, von dem es mit einem Rollboden den Presswerkzeugen zugeführt wird. Diese als Rotor oder Schnecke ausgeführten Presswerkzeuge fördern und Verdichten das Gut im angeschlossenen Stahltunnel, auf dessen Außenseite der gefaltete Folienschlauch aufgelegt ist. Das verdichtete Siliergut wird durch den Druck des nachfolgenden Materials in den sich langsam vom Stahltunnel ziehenden Folienschlauch geschoben. Der gefüllte Schlauch liegt direkt im Anschluss an den Stahltunnel auf dem Boden, während sich die Maschine langsam vorwärts bewegt (LEURS, 2006). Der Schlauchdurchmesser kann durch wechseln des Presstunnels und der Schlauchgröße an die voraussichtliche Entnahmemenge angepasst werden.



**Abbildung 5: Prinzipskizze des Siloschlauchverfahrens (links) und Schlauchpresse während der Einlagerung (rechts) (mod. nach WAGNER, 2006)**

Der Aufbau des Pressdruckes erfordert ein Anbremsen der Maschine gegen den gefüllten Schlauch, welches durch ein manuell regelbares hydraulisches Bremssystem realisiert ist. Der Grad der Schlauchfüllung ist über die Beobachtung der Foliendehnung an aufgedruckten Messstreifen vom Maschinenbediener (Dehnung der Folie um 10 bis 15 %) zu kontrollieren. Je nach Futterart, Trockensubstanzgehalt und Untergrund ergibt sich nach Dehnungsmessung ein bestimmter einzustellender Hydraulikdruck, der für die notwendige Bremskraft gegenüber dem gefüllten Schlauch sorgt. Die Schlauchdehnung ist während der Pressung ständig zu überwachen, um den Bremsdruck nachregeln zu können.

Nach Abschluss der Einlagerung ist das Schlauchende mit einem speziellen Klemmverschluss zu verschließen und das ganze Silo gegen Vögel durch Aufbringen von Netzen zu schützen. Zur Entlüftung der sich anfangs bildenden Gärgase wird ein spezielles verschließbares Rohrstück in die Schlauchfolie eingesetzt, was nach wenigen Tagen zu verschließen ist, um das Eindringen von Luft zu verhindern.

Die Entnahme erfolgt mit den vom Flachsilo bekannten Geräten, wobei die Folie stückweise abzuschneiden ist. Um ein Weiterreißen der gespannten Folie zu vermeiden, sollte diese nicht in Längsrichtung aufgeschnitten werden.

## **2.2 Gärbiologische und gärtechnische Grundlagen**

Die Bereitung von Silage soll den Nährwert eines zu konservierenden Futters weitestgehend erhalten (JEROCH et al., 1998 und PAHLOW, 2006). Grundbedingung für den Beginn der Silierung eines Erntegutes ist dessen Einbringung in ein möglichst luftdichtes Silo unter Minimierung der Restluft im Stapel. Das Siliergut muss einen ausreichenden Feuchtegehalt, genügend vergärbare Zucker (hoher Z/PK-Quotient) und siliertaugliche Milchsäurebakterien besitzen. In der ersten Phase der Silierung erfolgt durch aerobe Mikroorganismen und Enzyme ein aerober Nährstoffabbau von Zucker zu CO<sub>2</sub>, der zu einer Erwärmung des Silos mit geringem Energieverlust führt. In Folge des abnehmenden Sauerstoffgehaltes kommt es zum Absterben der obligat aeroben Mikroorganismen und einer raschen Vermehrung von fakultativ anaeroben, coliformen Keimen.

Die Veratmung des Restsauerstoffs dauert im geschlossenen Silo nur wenige Stunden (WEIßBACH, 1968). Die coliformen Keime erzeugen vorwiegend Essigsäure und CO<sub>2</sub> als Stoffwechselprodukte. Im weiteren Verlauf werden diese von den wesentlich säuretolanteren Milchsäurebakterien überwachsen, die unter Sauerstoffausschluss vergärbare

Kohlenhydrate fermentieren. Homofermentative Milchsäurebakterien fermentieren unter geringen Verlusten zu Milchsäure, während heterofermentative Milchsäurebakterien unter höheren Verlusten Glukose auch zu Essigsäure und Ethanol umwandeln.

Der zunehmende Gehalt an organischen Säuren führt zu einer raschen Ansäuerung auf pH-Werte von 4 bis 5, was zur Inaktivierung der meisten Mikroorganismen und der pflanzlichen Enzyme führt. Es wird ein überwiegender Anteil Milchsäure gewünscht, da sie neben der pH-Wert Absenkung weitere positive Eigenschaften wie Geruchlosigkeit, gute Verträglichkeit für die Tiere sowie eine Hemmung auf buttersäurebildende Clostridien aufweist (DLG, 2006). Die gesamte Hauptgärphase dauert bei einer Umgebungstemperatur von 15°C zwischen 7 und 10 Tagen (PAHLOW, 2006).

Die mit der Milchsäuregärung einhergehende Essigsäuregärung wird im begrenzten Umfang durchaus gewünscht, da die Essigsäure erheblich zur aeroben Stabilität nach der Silo-öffnung beiträgt. Sie verursacht jedoch einen erheblich höheren Trockensubstanzverlust und Eiweißabbau sowie einen schlechteren Geruch und Geschmack der Silage. Bei CCM wird ein Verhältnis von Milch- zu Essigsäure von 4:1 angestrebt (DEDERER, 1988)

In Folge der pH-Wert Absenkung und des Verbrauches der Zucker nimmt die Zahl und die Aktivität der Milchsäurebakterien erheblich ab. Die Population der Milchsäurebakterien verringert sich bis auf 0,1 % der Maximalpopulation. Die äußerst säuretoleranten Hefen vergären anschließend den verbliebenen Restzucker langsam zu Alkohol. Ihre Aktivität in der anaeroben Phase ist insgesamt stark vom Ausgangsbesatz abhängig. Die Absenkung des pH-Wertes wird als Parameter für die Bewertung des Siliererfolges und der anaeroben Stabilität der Silage verwendet. Diese muss jedoch immer in Kombination mit der Wasseraktivität bewertet werden, da die erreichte Azidität umso höher sein muss, je höher die Wasseraktivität der Silage ist, um diese stabil zu halten (WEIßBACH, 1968).

Bei einer gelungenen Silierung kann die Silage unter Luftabschluss für einen langen Zeitraum mit nur geringen Verlusten gelagert werden.

### **2.2.1 Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Siliereigenschaften**

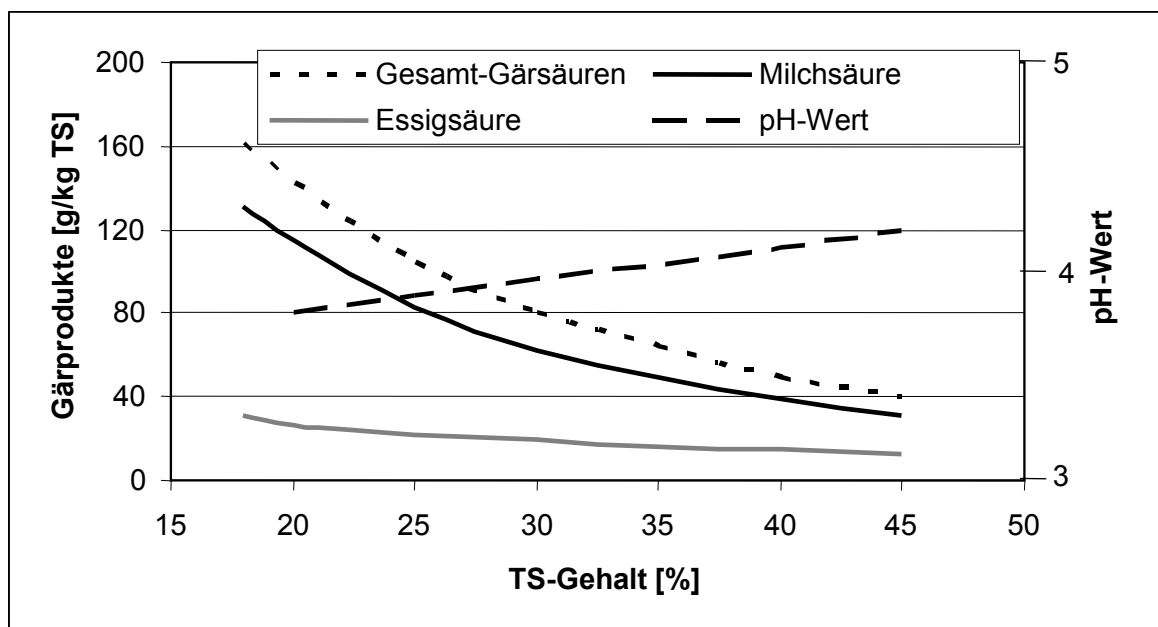
Die Bereitung von Silage wird mit Erntegütern sehr unterschiedlicher Eigenschaften durchgeführt, deren Einflüsse die Vergärbarkeit eines Siliergutes bestimmen. Nach JEROCH et al. (1998) und PAHLOW (2006) hängt die Vergärbarkeit vorwiegend von der chemischen Zusammensetzung des Erntegutes ab. Die vom Pflanzenbestand ausgehenden

Größen sind vor allem der Gehalt an vergärbaren Zuckern und die Pufferkapazität. Diese ist eng an den Eiweißgehalt der Pflanzen gebunden. Neben diesen Faktoren wirken sich die stark vom Erntezeitpunkt abhängigen Größen Rohfaser- und TS-Gehalt auf die Siliereignung aus. Die Partikelzusammensetzung und der Schmutzgehalt des Siliergutes können noch zum Erntezeitpunkt durch die entsprechende Verfahrenstechnik beeinflusst werden. Bei der Bergung von Grassilage ist zusätzlich noch der TS-Gehalt des Siliergutes mit angepasster Aufbereitungstechnik und Anwelkzeit zu beeinflussen. Der Zuckergehalt wird als der wichtigste Faktor für eine intensive Milchsäuregärung angesehen (THORSTEINSON et al., 1996), da dieser die Nahrung für die in jedem Siliergut vorhandenen Milchsäurebakterien darstellt. Im Fall von Gras sinkt der Gehalt an vergärbaren Zuckern mit zunehmender Pflanzenentwicklung ab, wohingegen der Rohfasergehalt stark zunimmt. Für eine optimale Siliergutqualität ist deshalb der Schnittzeitpunkt von entscheidender Bedeutung. Der Eiweißgehalt und somit die Pufferkapazität sind zum einen stark von Pflanzenart und Entwicklungsstand und zum anderen von der N-Düngung abhängig. Das Verhältnis von Zucker zur Pufferkapazität (Z/PK-Quotient) kennzeichnet die Silierbarkeit eines Erntegutes. Letztere ist in diesem Zusammenhang durch die erforderliche Milchsäuremenge in g/kg TS definiert, die zur Ansäuerung des Siliergutes auf pH 4,0 notwendig ist. Der Zuckergehalt kann z.B. durch die Zugabe von Melasse erhöht und so die Silierbarkeit verbessert werden.

**Tabelle 1: Vergärbarkeitskennndaten verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999)**

Futterpflanze	Trockensubstanz g/kg Originalsubstanz	Rohprotein g/kg TS	Zucker (Z) g/kg TS	Pufferkapazität (PK) g Milchsäure/kg TS	Z/PK-Quotient
<b>Mais</b>	280 (200-350)	75	230	35	6,6 (4,7-8,8)
<b>Zuckerrübenblatt</b>	145 (120-180)	135	285	52	5,5 (1,9-10,8)
<b>Markstammkohl</b>	155 (140-190)	150	290	66	4,4 (3,5-5,0)
<b>Grünhafer</b>	220 (145-265)	95	130	40	3,3 (2,7-4,7)
<b>Felderbse</b>	155 (130-165)	180	155	49	3,2 (2,4-3,6)
<b>Ackerbohne</b>	150 (110-165)	175	145	49	3,0 (1,6-3,2)
<b>Süßlupine</b>	150 (120-160)	180	115	46	2,5 (1,8-3,0)
<b>Gräser</b>	200 (140-270)	140	115	47	2,4 (0,8-4,6)
<b>Grünroggen</b>	160 (155-210)	155	135	56	2,4 (1,6-3,3)
<b>Rotklee</b>	200 (165-250)	165	115	69	1,7 (0,9-1,8)
<b>Luzerne</b>	200 (150-220)	190	65	74	0,9 (0,5-0,9)

Der TS-Gehalt eines Siliergutes wirkt sich in verschiedener Hinsicht auf die Silierbarkeit der Erntegüter aus. Bei TS-Gehalten über 75 %, wie sie bei der Einlagerung von Feuchtgetreide vorkommen, findet aufgrund der zu geringen Wasseraktivität keine Milchsäuregärung statt (MATTHIESEN, 2007). In diesem Fall ist von einer gasdichten Lagerung in CO<sub>2</sub>-Atmosphäre auszugehen, die aber für die Zeit der Futterentnahme unter Lufteinfluss den einsetzenden Verderb nicht verhindern kann. Im für Grundfuttersilagen relevanten TS-Bereich von 25 bis 45 % nimmt die Intensität der Milchsäuregärung mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt infolge der verringerten Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen deutlich ab (AUERBACH, 2004).



**Abbildung 6: Beziehung zwischen Trockensubstanzgehalt und Gärintensität bei Silomais (mod. nach AUERBACH, 2004)**

Die erforderliche Ansäuerung, um die Silage während der geschlossenen Lagerung stabil zu halten, verringert sich jedoch auch mit zunehmendem TS-Gehalt, da Gärschädlinge, wie Clostridien, bei geringerer Wasseraktivität weniger säuretolerant sind und schon bei höheren pH-Werten ihre Aktivität stark vermindern. In Tab. 2 sind die kritischen pH-Werte zur Erzeugung lagerstabiler Silagen dargestellt. Während bei 20 % TS-Gehalt der pH-Wert auf 4,2 oder tiefer abgesenkt werden muss, genügt bei 40 % TS-Gehalt bereits eine Ansäuerung auf pH 4,75. Je geringer das Säuerungspotential des Grünfutters ist, desto stärker



sollte angewelkt werden. Um den Austritt von größeren Mengen Sickersaft zu vermeiden, sollte das Siliergut jedoch mehr als 28 % TS-Gehalt aufweisen.

**Tabelle 2: Kritische pH-Werte für Silagen in Abhängigkeit des TS-Gehaltes (WAGNER, 2006)**

TS-Gehalt [%]	20	25	30	35	40
Stabilität der Silagen gegeben bei pH-Wert von	4,20	4,35	4,45	4,60	4,75

Die positive Wirkung von Impfkulturen auf den Gärverlauf nimmt mit zunehmendem TS-Gehalt ab, selbst wenn es sich um relativ osmotolerante Bakterien handelt. Deshalb und aus Gründen der Verdichtbarkeit sollten bei Gras nur TS-Gehalte bis 40 % angestrebt und solche von über 45 % vermieden werden (WEIßBACH, 2002).

Wie in Abb. 6 dargestellt, nimmt die Gärintensität mit zunehmendem TS-Gehalt deutlich ab, wobei vor allem beim Einsatz homofermentativer Milchsäurebakterien der Essigsäuregehalt der Silagen sehr niedrig bleibt. Höchste Gärsäuregehalte (150g/kg TS) wurden bei Nasssilagen mit TS-Gehalten < 20 % festgestellt, während Silagen mit > 40 % TS-Gehalt nur Gehalte von 50 g/kg TS aufwiesen (RESCH, 2002). Sehr niedrige Essigsäuregehalte begünstigen jedoch die durch Hefen verursachte Nacherwärmung, da speziell der undissoziierte Teil der Essigsäure auf diese im Gegensatz zur Milchsäure eine stark hemmende Wirkung besitzt.

Die durch Clostridien ausgelöste Buttersäuregärung ist aus den nachfolgend beschriebenen Gründen unerwünscht und deshalb auf ein Minimum zu reduzieren. Sie verursacht erhebliche Eiweißverluste, ein Ansteigen des pH-Wertes, welches zu weiteren Verderbprozessen, sowie zu einem sehr schlechten Geruch der Silage führt. Die aus stark buttersäurehaltigen Silagen erzeugte Milch ist nur eingeschränkt verwertbar, da ihre Käseereitauglichkeit unzureichend ist.

Clostridien befinden sich im Boden und gelangen über Verschmutzungen in die Silage. Um deren Eintrag in das Siliergut so gering wie möglich zu halten, ist die gesamte Verfahrenstechnik der Silagebereitung zu optimieren (OPITZ VON BOBERFELD, 1999). Eine starke Ansäuerung in Folge intensiver Milchsäuregärung unterdrückt die Aktivität der nicht so säuretoleranten Buttersäurebakterien. Deshalb ist die Einstellung optimaler

Bedingungen für die Milchsäuregärung von großer Bedeutung für die Vermeidung von Fehlgärungen.

Hefen vergären unter anaeroben Bedingungen Zucker zu Alkohol und CO<sub>2</sub>. Milchsäure hat auf sie, im Gegensatz zu Essig- und Buttersäure, keine hemmende Wirkung, was ihnen gerade in gelungenen Silagen mit geringen Butter- und Essigsäuregehalten gute Bedingungen verschafft. Unter Lufteinfluss, also bei geöffnetem Silo, können sich Hefen rasch vermehren und in kurzer Zeit einen Teil der gebildeten Gärsäuren unter Erwärmung der Silage veratmen.

In Folge des hierdurch verursachten pH-Wert Anstieges kann sich noch ein bakterieller Verderb anschließen. Die Trockensubstanzverluste durch die Aktivität von Hefen können bis zu 3 % pro Tag betragen (DLG, 2006 und OPITZ VON BOBERFELD, 1999).

In der folgenden Tab. 3 sind die wichtigsten an der Vergärung beteiligten Mikroorganismen, deren Ansprüche an das Milieu sowie ihre Stoffwechselwirkung dargestellt.

**Tabelle 3: Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen und Silierschädlinge für die Silierung (mod. nach JEROCH et al., 1999)**

<b>Mikrobengruppe</b>	<b>Verhalten zu Luftsauerstoff</b>	<b>Inaktiv bei pH</b>	<b>Kohlenhydrat- vergärung/-veratmung</b>	<b>Eiweißabbau</b>
<b>Milchsäurebakterien</b>	Fakultativ bis obligat anaerob	< 3,0-3,6	Stark zu Milchsäure, Alkohol, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, (Essigsäure )	Ohne
<b>Coliaerogenes Gruppe</b> (Coliforme Keime)	Fakultativ anaerob	< 4,3-4,5	Stark zu Essigsäure, CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O (Ameisensäure)	Ohne oder schwach
<b>Clostridien</b> Saccharaolyten Protocolyten	Obligat anaerob	< 4,2-4,4	Stark zu Buttersäure CO <sub>2</sub> (Essigsäure)	Ohne stark zu Amin + CO <sub>2</sub> , Carbonsäure+NH <sub>3</sub>
<b>Fäulnisbakterien</b> (Pseudomonas, Alclaigenes-Arten)	Aerob bis fakultativ anaerob	< 4,2-4,8	Stark zu CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Sehr stark
<b>Hefen</b>	Aerob bis fakultativ anaerob	< 1,3-2,2	Anaerob zu Alkohol, aerob zu CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O Acetaldehyd	Gering
<b>Schimmelpilze</b>	Obligat aerob	< 2,5-3,0	Stark zu CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Stark

Schimmelpilze sind obligat aerobe, stark qualitätsmindernde Silierschädlinge, die im Erntegut immer in einem geringen Ausgangsbesatz vorhanden sind und sich schon unter sehr

geringem Sauerstoffeinfluss vermehren können. Von besonderer Bedeutung für die Silierung ist die Art *Penicillium roqueforti* (AUERBACH, 1996).

Das Wachstum der Kolonien wird durch Lufteintritt von außen in das Silo und durch Luft-einschlüsse in Folge von schlechter Verdichtung begünstigt. *Penicillium roqueforti* tritt meistens in kugelförmigen Kolonien in der Silage auf. Die Pilze und vor allem die von ihnen gebildeten Toxine beeinflussen die Tiergesundheit, insbesondere die Fruchtbarkeit von Milchkühen negativ. Aus diesen Gründen ist die Vermeidung von Schimmel in Silagen ein sehr wichtiges Kriterium für das gesamte Verfahren der Silierung. Befallene Silagen dürfen keinesfalls verfüttert werden (AUERBACH, 1996).

### 2.2.2 Silierverluste

Gärverluste (GV) bei der Silierung von Futtermitteln sind generell nicht zu vermeiden, da bei biochemischen Umsetzungsprozessen immer Energieverluste auftreten. Unter Gärverlusten wird der auf die Gärgasbildung zurückzuführende TS-Verlust verstanden. Die durch aeroben Stoffumsatz verursachten TS-Verluste sind von den Silierverlusten getrennt zu betrachten (ASHBELL und LISKER, 1988). Sie entstehen bereits während der Einlagerung des Siliergutes in Form von aeroben Umsetzungen bei noch nicht geschlossenem Silo (MC DONALD et al., 1991). Eine Verkürzung der aeroben Befüllphase verringert neben den Atmungsverlusten auch das Wachstum der Hefenpopulation, die nach der Siloöffnung eine Hauptursache für Nacherwärmung darstellen (WEIßBACH, 1998). Die Wahl der Siliertechnik und vor allem deren Anwendung haben jedoch entscheidenden Einfluss auf die Größe des Silierverlustes, für dessen Bestimmung verschiedene Methoden Anwendung finden.

Die ursprüngliche Methode für die Bestimmung des Gärverlustes ist der Vergleich der in einem Versuchssilo eingebrachten mit der später wieder ausgelagerten TS unter Berücksichtigung von ggf. abfließendem Sickersaft. Das gleiche Prinzip wird bei der Bilanznetz-methode angewendet (WEBER, 2005). Bei dieser werden mit Siliergut gefüllte Netzbeutel im Siliergutstapel vergraben und bei der Entleerung des Silos wieder entnommen. Sicker-saftbildung darf nicht auftreten, da der den Netzbeutel verlassende Trockensubstanzanteil nicht erfasst werden kann. Die Bilanzierung des Verlustes erfolgt durch das vor- und nachherige Bestimmen der Trockensubstanzeinwaage (MATTHIESEN, 2008). Bei dieser Methode ist sowohl eine Korrektur des TS-Gehaltes der Silage um flüchtige Stoffe als

auch eine Korrektur des TS-Gehaltes im Futter um während der Trocknung entstandene Atmungsverluste erforderlich. Diese Methode ist jedoch auch bei Durchführung der Korrekturen sehr ungenau, da die zu bestimmende Größe nicht direkt gemessen, sondern sich nur indirekt aus der relativ kleinen Differenz zweier zu messender TS-Größen ergibt. In die sich ergebene Differenz gehen alle Zufallsfehler der Wiegung, der Probenahme und der Bestimmung des TS-Gehaltes ein (WEIßBACH, 1998).

Wesentlich genauere Ergebnisse sind bei der direkten Messung der gebildeten Gärgasmenngen zu erwarten. Diese können entweder durch die Bestimmung des Volumens der aus dem Silo entweichenden Gase und ihrer Zusammensetzung erfasst oder durch Absorption der Gärgase in geeigneten Vorrichtungen mit anschließender Wiegung derselben bestimmt werden. Beide Methoden sind jedoch mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden, insbesondere wenn die Gasmengenmessung an Silos im Pilotmaßstab (Silogrößen im Kubikmeterbereich) durchgeführt wird. In Versuchen ist man letztlich zu der Erkenntnis gekommen, dass die meisten Fragestellungen auch mit unter gleichen physikalischen Bedingungen betriebenen Silos im Labormaßstab zu beantworten sind (Silogröße im Literbereich) (WEIßBACH, 1998).

Bei den Versuchen unter Verwendung der Methode der Gasmessung wurden immer geringere Verluste als mit der TS-Bilanzmethode errechnet. Dies ist durch verbleibende CO<sub>2</sub>-Mengen im Silostock zu erklären, die sich nur durch evakuieren und zum Teil durch Trocknen, d.h. Erhitzen von der Silage trennen lassen. Die Resultate der Versuche zeigten, dass der CO<sub>2</sub>-Anteil, der die Silage nicht selbstständig verlässt, einen beträchtlichen Anteil des Gärverlustes ausmacht (WEIßBACH, 1998).

Die Gärverluste sind auch mit einer erheblich weniger aufwändigen Methode im Labormaßstab unter Verwendung vollständig dichter Silierbehälter zu ermitteln. Die Behälter werden nach der Befüllung und vor der Öffnung nach der Silierdauer mit einer hinreichend hohen Wiegegenauigkeit verwogen. Bei der Berechnung des Gärverlustes aus der Massendifferenz (MD) muss dann lediglich noch der im Silo verbliebene Teil des gebildeten CO<sub>2</sub> berücksichtigt werden. Die Frage, auf welche Weise das am zuverlässigsten geschehen kann, ist bisher noch nicht überzeugend beantwortet worden. Einige Autoren multiplizieren die auf die TS-Einwaage bezogene MD mit einem Faktor von 1,4 (GROSS und RIEBE, 1974; HONIG und PAHLOW, 1986). Dieser Faktor beruht auf empirisch ermittelten Werten, wurde jedoch nie wissenschaftlich begründet. Im arithmetischen Mittel konnte er

auch in weiteren Versuchen bestätigt werden, wobei jedoch große Schwankungen des Wertes von 1,1 bis 2,5 auftraten (BERG, 1971).

Bei geringem Verlustniveau wird der GV erheblich unterschätzt und bei hohem überschätzt. Die Auswertungen ergaben, dass die auf das Wasser bezogene Kohlendioxidmenge weit über dem angenommenen Betrag von 2 g CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O lagen. Ganz offensichtlich besteht kein Zusammenhang zwischen dem im Silo zurückbleibenden CO<sub>2</sub> und dem Wasser in der Silage (WEIßBACH, 1998). Dagegen besteht eine enge Beziehung zwischen dem festgehaltenen CO<sub>2</sub> und der TS der Silage. Je 100 g TS wird in etwa eine gleiche Menge an CO<sub>2</sub> im Silo zurückgehalten. Es ist deshalb davon auszugehen, dass es sich dabei nicht nur um in Wasser gelöstes CO<sub>2</sub>, sondern auch um an der Oberflächenstruktur der festen Phase absorbiertes CO<sub>2</sub> handelt. Der geringste Fehler entsteht deshalb dann, wenn in der Rechnung ein konstanter Korrekturbetrag in Abhängigkeit von der TS berücksichtigt wird. Im Mittel der von BERG (1971) durchgeführten Versuche ergibt sich ein Betrag von 2,5 % der TS, wenn man das durch Evakuieren des Silos und das beim Trocknen der Silage freigesetzte CO<sub>2</sub> addiert. Folgende Korrekturformel kann für die Berechnung des Gärverlustes bei Laborversuchen angewendet werden (WEIßBACH, 1998):

**Gleichung 1:**

$$GV [\%] = 100 \cdot \frac{MD[g]}{TS \text{ Einwaage } [g]} + 2,5$$

WENCK et al. (1973) und KRAXNER (1979) ermittelten bei CCM-Silage Trockensubstanzverluste von 5 bis 8 %, wobei diese mit zunehmender Feuchte der Silage anstiegen. In ähnlich ausgerichteten Versuchen ermittelten JAKOB et al. (1986) und REXILIUS (1985) unter optimalen Bedingungen im Labor deutlich geringere Trockensubstanzverluste von 0,5 bis 3 %.

Unter Praxisbedingungen sind die bei der Silierung auftretenden TS-Verluste in Sicker-saftverluste, gasförmige Silierverluste und aerobe Verluste durch Nacherwärmung einzuteilen. Erstere nehmen mit zunehmendem TS-Gehalt deutlich ab und sind ab ca. 30 % TS nicht mehr relevant (RESCH, 2006). Die Intensität der Gärung und das Risiko von Fehlgärungen nimmt mit steigenden TS-Gehalten ebenfalls ab, woraus sinkende gasförmige Verluste resultieren (AUERBACH, 2004). Erheblicher Luftzutritt zum Silo während der geschlossenen Lagerung führt grundsätzlich zu gesteigerten Silierverlusten und vor allem

zu beeinträchtigter Silagequalität durch das Wachsen von Schimmelpilzkolonien (AUERBACH, 1996). Die während der Entnahme unter Lufteinfluss auftretenden Verluste sind vor allem durch die Atmungsaktivität von Hefen gekennzeichnet. Auf die Zusammenhänge wird im folgenden Kap. 2.2.3 genauer eingegangen. Die tatsächlichen Silierverluste während der geschlossenen Lagerung sind neben den für die Gärung relevanten Silierguteigenschaften (Kap. 2.2.1) auch von der Anwendung der Siliertechnik abhängig und betragen bei einer gelungenen Gärung 4 bis 10 % (MUCK und HOLMES, 2000). Unabhängig vom Silotyp können ein schneller und möglichst vollständiger Luftabschluss sowie eine hohe Lagerungsdichte dazu beitragen, die Verluste zu minimieren. Die Höhe der während der Entnahmephase entstehenden Verluste wird neben dem mikrobiellen Ausgangsbesatz, dem Restzuckergehalt und der Gärsäurezusammensetzung stark vom Sauerstoffeinfluss auf das Siliergut bestimmt (PAHLOW, 2003). Diese können zwischen wenigen Prozent und im ungünstigen Fall bis zu 20 % und mehr betragen.

Die Dauer des Sauerstoffeinflusses auf die Silage an der Anschnittfläche und im Bereich dahinter ist zum einen vom Entnahmevorschub und zum anderen von der Porosität der Silage abhängig (Abb. 7). Der Einfluss der Porosität, die eng an die Lagerungsdichte gebunden ist, auf die durch Nacherwärmung verursachten Trockensubstanzverluste ist erheblich größer als auf die Gärverluste während der geschlossenen Lagerung. Die Gesamtverluste bei der Futterkonservierung mit Hilfe der Silierung lassen sich nicht eindeutig nach dem gewählten Verfahren abstufen.

Die Sicherstellung der anaeroben Bedingungen ist jedoch nicht bei jedem Verfahren gleich einfach zu realisieren. Beim teuren Verfahren des gasdichten Hochsilos ist davon im Normalfall sicher auszugehen, wohingegen die Sicherstellung anaerober Bedingungen im Flachsilo stark von der Handhabung und Sorgfalt bei der Ausführung abhängig ist. Ein Zeitverzug zwischen Einlagerung und Abdeckung ist beim Flachsiloverfahren unvermeidbar, weshalb der Luftabschluss des Siliergutes nicht so schnell erfolgen kann wie bei der Einbringung in Folienschläuche oder der Konservierung im Silageballen. Das Folienschlauchverfahren gewährleistet an sich einen nahezu vollständigen Luftabschluss durch den rundum geschlossen Schlauch, der an den Stirnseiten mit Hilfe von Klemmprofilen dicht verschlossen werden kann. Die Voraussetzungen seitens der Silotechnik für eine Verlustarme Silierung sind somit gegeben. STEINHÖFEL und WEBER (2005) stellten bei der Silierung von Feuchtmais Konservierungsverluste von nur 3,5 % fest: MUCK und HOLMES (2004) beziffern die Gesamtverluste bei ihren Untersuchungen an Gras- und

Maissilageschläuchen auf durchschnittlich 14 %. Die Spanne war jedoch mit Werten von 1,0 bis 38 % sehr groß. Die gemessenen Silierverluste lagen von 0,3 bis 15 % mit einem Mittelwert von 8,4 %, während die Verluste durch Nacherwärmung von nicht messbar bis zu 25 % variierten. Zur Erklärung der sehr hohen Verluste wurden vor allem massive Beschädigungen der Schlauchfolie durch Vögel angegeben, die zu erheblichem Luftzutritt zum Silo führten. Auch bei den Untersuchungen von STEINHÖFEL und WEBER (2005) sowie von MATTHIESEN (2008) kam man zu dem Schluss, dass Beschädigungen der Schlauchfolie durch Aufbringen von Schutznetzen unbedingt zu verhindern bzw. schnellstmöglich zu reparieren sind, um eine verderbfreie und verlustarme Konservierung sicherzustellen. Luftzutritt infolge von Beschädigungen der Folie gefährdet auch die Lagersicherheit von gut vergorenen Silagen und führt lokal zu ausgeprägtem Schimmelbefall.

### **2.2.3 Aerobe Stabilität und Nacherwärmung von Silagen**

Die aerobe Stabilität beschreibt den maximalen Zeitraum zwischen der Entnahme und dem Verbrauch des Futtermittels, in dem kein Verderb eintritt (DEDERER, 1988). Als Parameter für die Beurteilung des einsetzenden Verderbs werden der Temperaturanstieg und der Anstieg des pH-Wertes während der Lagerung unter Lufteinfluss gemessen. Nach DLG (2000) und PAHLOW et al. (2004) ist die aerobe Stabilität definiert als Zeitraum, gemessen in Tagen, bis die Temperatur des Siliergutes die Umgebungstemperatur unter Laborbedingungen dauerhaft um mindestens 3 K überschreitet.

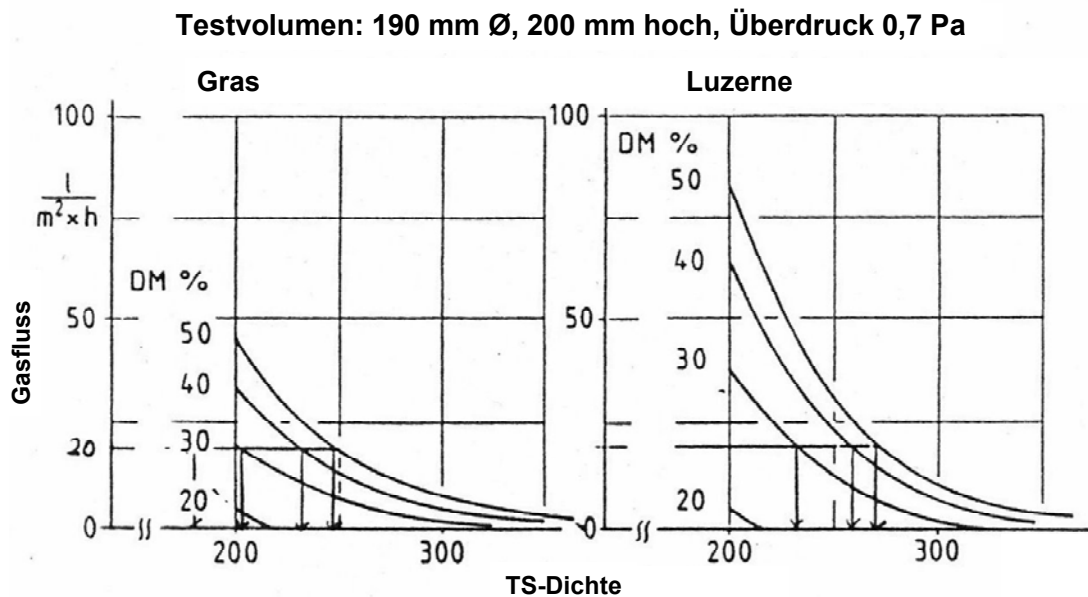
Die Dauer der aeroben Stabilität einer Silage hängt neben der Außentemperatur und dem Mikrobenbesatz vor allem von der Gärsäurezusammensetzung und dem TS-Gehalt ab. Nach SPIEKERS (2006) sollte eine Silage mindestens drei Tage stabil sein; THAYSEN (2004) fordert mindestens fünf Tage. Buttersäurebildende Clostridien, die in Silomais aufgrund der großen Schnitthöhe nur mit geringem Besatz vorkommen, werden durch Milchsäure und hohe TS-Gehalte unterdrückt, sodass die an sich unerwünschte Buttersäure nur in sehr geringen Mengen gebildet wird. Dieser wird jedoch gerade auf die wesentlich an der Nacherwärmung beteiligten Hefen eine hemmende Wirkung zugeschrieben (DLG, 2006 und WOOLFORD, 1982). Alkohol und Essigsäure haben ebenfalls hemmende Wirkung auf Hefen (RUSER und PAHLOW, 2003); werden allerdings aus Sicht der Tierernährung sowie der angestrebten hohen Futteraufnahme nur in geringen Anteilen toleriert. Insgesamt weisen energiereiche Silagen mit hohen TS-Gehalten und guter Gärqualität eine geringere aerobe Stabilität auf, die mit Hilfe von Silierzusätzen verbessert werden kann.

MC DONALD et al. (1991) stellte fest, dass vor allem Valerian- und Capronsäure hemmend auf Hefen wirken. Versuche haben gezeigt, dass eine Populationsdichte von 100.000 Hefen pro Gramm Silage zu Beginn der Entnahmephase als kritischer Wert angenommen werden kann (DLG, 2006).

Aus dem Blickwinkel der Verfahrenstechnik sind neben einer Verbesserung der aeroben Stabilität, alle Maßnahmen, die die Lufteinwirkung auf die Silage beeinflussen, von großer Bedeutung. Dies sind vor allem die Verdichtung, der luftdichte Abschluss, der TS-Gehalt, die Partikelzusammensetzung, der tägliche Vorschub und die dabei eingesetzte Entnahmetechnik (MATTHIESEN, 2007). Die Beurteilung einer Silage bezüglich der Nacherwärmung im Silo kann jedoch nicht eindeutig an der Differenz zur Außentemperatur definiert werden. NUSSBAUM (2006) geht ab einer Temperaturdifferenz von 5 K zwischen verschiedenen Silagepartien von einer Nacherwärmung aus. In anderen Untersuchungen wurde ab einer um 10 K über der Außentemperatur liegenden Silagetemperatur von einer Nacherwärmung ausgegangen (STEINHÖFEL und WEBER, 2004; THAYSEN, 2004; SPIEKERS, 2002). Unabhängig von der Außentemperatur wird eine Kerntemperatur von ausgekühlten Silagen von 10 bis 15°C als nicht erwärmt eingestuft (SPIEKERS und POTTHAST, 2004).

Die verfahrenstechnischen Maßnahmen zur Minimierung der Lufteindringung an der Anschnittfläche beeinflussen nicht direkt die aerobe Stabilität, sondern verkürzen die Lagerphase im Silo, in der Sauerstoff auf das Siliergut einwirken kann. Mit zunehmender Lagerungsdichte sinkt das für Gase zur Verfügung stehende Porenvolumen, woraus ein stark ansteigender Strömungswiderstand entsteht. Der Zusammenhang zwischen Porenvolumen, Strömungswiderstand und Lufteindringung wurde von HONIG untersucht und ist in Abb. 7 dargestellt (HONIG, 1987).

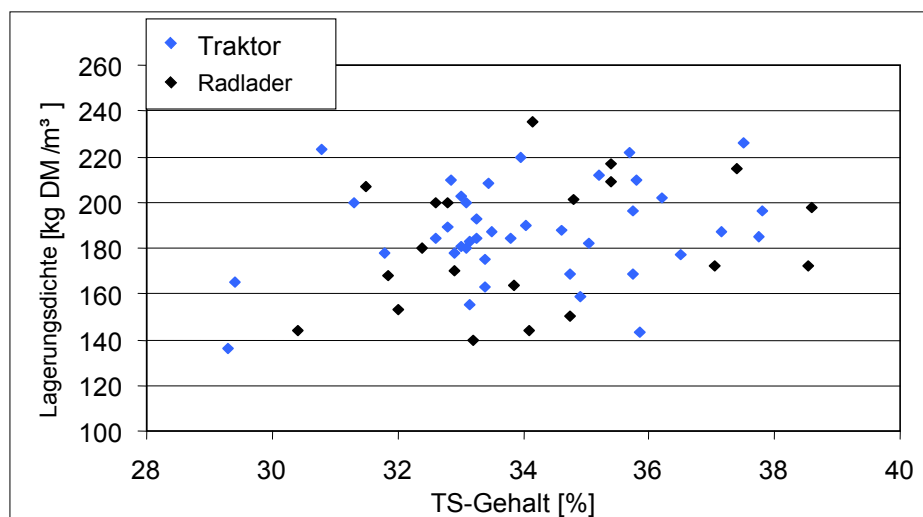




**Abbildung 7: Gasfluss durch einen Probebehälter in Abhängigkeit von TS-Gehalt und Lagerungsdichte (Häckselgut Gras und Luzerne) (HONIG, 1987)**

Es ist zu erkennen, dass mit abnehmender Lagerungsdichte und zunehmendem Porenvolumen die Luft eindringung überproportional ansteigt. Nach HONIG ist das Siliergut so zu verdichten, dass die Luft eindringungsrate auf  $20 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  begrenzt wird (HONIG, 1987). Aus dieser Forderung leiten sich für zunehmende TS-Gehalte steigende Mindestlagerungsdichten ab, da die verringerte Volumenverdrängung des Wasseranteils zu kompensieren ist, um das Porenvolumen konstant zu halten. Für Mais mit einem TS-Gehalt von 28 % ergibt sich eine Minstdichte von  $230 \text{ kg TS m}^{-3}$  und für Anwelksilage gleichen TS-Gehaltes von  $200 \text{ kg TS m}^{-3}$ . Im Fall von Maissilage erfordern TS-Gehalte von 33 % bereits Lagerungsdichten von  $270 \text{ kg TS m}^{-3}$ .

Im Rahmen des Projektes „Nacherwärmung“ der Landwirtschaftskammer NRW aus dem Jahre 2004 wurden auf 62 Betrieben Dichtemessungen an Maissilagen vorgenommen. Hierbei wurden Flachsilos von oben mit dem Entnahmegerät „Siloboy“ beprobt, wobei die Messtiefe ca. 1,2 m betrug. Die in Abb. 8 dargestellten Dichtewerte geben so eine durchschnittliche Lagerungsdichte für den oberen Abschnitt der beprobten Silos wieder (SPIEKERS et al., 2004).



**Abbildung 8:** Lagerungsdichte von Maissilage in 63 Flachsilos (Verdichtung mit Traktor oder Radlader) (mod. nach SPIEKERS et al., 2004)

Offensichtlich lagen nahezu alle der beprobten Silagen weit unter den vorher angenommenen Sollwerten, wobei die gemessenen Lagerungsdichten eine große Spannweite von 140 bis 230 kg TS m<sup>-3</sup> aufwiesen. Die Verdichtungsfahrzeuge (Radlader oder Schlepper) hatten keinen signifikanten Einfluss auf die erzielten Dichten. Es war ebenso kein Anstieg der Lagerungsdichten im geforderten Maß mit zunehmendem TS-Gehalt festzustellen.

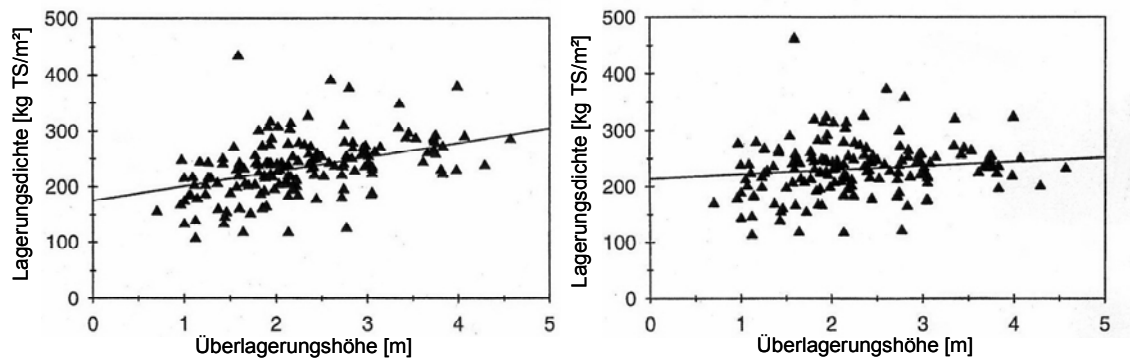
In einer von AMOURS und SAVOIE (2005) durchgeführten Untersuchung wurde die Lagerungsdichte von 7 Fahrsilos (Silomais) differenziert über die Anschnittfläche an 24 Beprobungspositionen gemessen. Die Probenahme wurde mit einem von Hand eingedrehten Zylinder (Ø 73 mm) in zwei Tiefestufen (0-180 mm und 180-360 mm) durchgeführt. Die 24 Beprobungspositionen am Silo waren festgelegt in 4 Ebenen zu je 6 Positionen von denen jeweils 3 im äußeren und 3 im mittleren Bereich der Silos angesetzt waren. Die untere, seitliche und obere Positionsreihe hatte jeweils einen Abstand von 50 cm zu Boden, Wand und Oberkante. Die beiden mittleren Ebenen wurden an die Silohöhe so angepasst, dass zwischen den 4 Ebenen ein jeweils gleicher Höhenabstand bestand. In lateraler Richtung lagen die jeweils 3 Positionen 50 cm auseinander. Für die Auswertung wurde nur die jeweils im Silo liegende Beprobungsstufe (180-360 mm) gewählt, da die dort gemessenen Dichten im Vergleich zu denen der ersten Stufe durchschnittlich um 9 % höher waren und deshalb von einem Auflockern an der Anschnittfläche auszugehen war. Die Beprobung aller Silos wurde drei Monate später und bei entsprechendem Entnahmefortschritt wiederholt. Die im Durchschnitt über alle Positionen und Silos ermittelte Lagerungsdichte lag am ersten Beprobungstermin bei 216 kg m<sup>-3</sup>. Bei der zweiten Beprobung wurden hingegen im

Durchschnitt  $232 \text{ kg m}^{-3}$  festgestellt, was zum Teil auf die durch den Entnahmefortschritt bedingte, größere Silohöhe (230 bzw. 255 cm) zurückzuführen war. Im Fall der bodennahen Beprobungsebene wurden Dichten von  $260 \text{ kg m}^{-3}$  erreicht, wohingegen in der oberen Ebene durchschnittlich mit  $213 \text{ kg m}^{-3}$  um 20 % geringere Dichten gemessen wurden. Im seitlichen Bereich nahe der Wand lagen die Lagerungsdichten um 8 % unter denen im mittleren Teil der Silos. Die Auswertung weiterer Einflussfaktoren wie Packungsfaktor (abhängig von Verdichtungsleistung und Fahrzeuggewicht), TS-Gehalt, Partikellänge und Kornanteil führte in dieser Untersuchung zu dem Ergebnis, das neben der Auflagehöhe nur der Kornanteil einen signifikanten Einfluss auf die Lagerungsdichte hat.

MUCK und HOLMES (2000) stellten hingegen in ihrer Studie über Faktoren, die die Lagerungsdichte in Fahrsilos beeinflussen, signifikante Wirkungen verschiedener anderer Parameter fest. Die Dichteuntersuchung wurde an 175 Fahrsilos unter Verwendung eines Kernbohrers (50 mm Ø, 30 cm Beprobungstiefe) durchgeführt. Die Überlagerungshöhe und die Höhe über dem Siloboden wurden für jede Bohrprobe erfasst. Die in Abb. 9 dargestellte Lagerungsdichte in Abhängigkeit der Überlagerungshöhe ergibt einen signifikanten Zusammenhang. Um den Einfluss der Parameter Schichtdicke, Walzfahrzeuggewicht, TS-Gehalt, Partikellänge, Verdichtungszeit, Fahrgeschwindigkeit und Reifeninnendruck zu untersuchen, wurden die gemessenen Dichtewerte nach einer von PITT (1983) entwickelten Formel auf eine standardisierte Überlagerungshöhe von 2,16 m umgerechnet:

**Gleichung 2:** 
$$\rho_F = \rho_{Fo} e^{K \rho_{Fo} g z}$$

Aus Abb. 9 (rechts) ist zu entnehmen, dass die durchgeführte Korrektur der Dichtewerte auf eine einheitliche Überlagerungshöhe die durch diese bedingten Dichteunterschiede nahezu ausgleicht und nur noch eine geringe Zunahme der Dichte mit steigender Überlagerungshöhe zu erkennen ist.



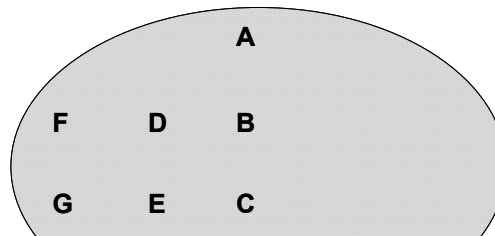
**Abbildung 9: Trockensubstanzdichte in Abhängigkeit der Überlagerungshöhe in Gras und Maissilagen (links) und eine nach Gleichung 2 auf einheitliche Überlagerungshöhe von 2,16 m korrigierte Trockensubstanzdichte (rechts) (n=175) (MUCK und HOLMES, 2000)**

Die statistische Auswertung der Daten für die erhobenen Parameter ergab für Schichtdicke und Walzschleppergewicht einen signifikanten Zusammenhang mit Korrelationskoeffizienten von -0,279 bzw. 0,262. Der TS-Gehalt ( $R = 0,224$ ), die Partikellänge ( $R = -0,194$ ) und die Verdichtungszeit ( $R = 0,162$ ) standen ebenfalls in einem zwar schwächeren, jedoch signifikanten Zusammenhang zur Lagerungsdichte. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde mit  $P < 0,05$  angegeben. Ergebnisse einer Laboruntersuchung zur Verdichtbarkeit von Maishäckselsgut (LEURS, 2006) verschiedener TS-Gehalte und variierender Partikellänge zeigen ebenfalls eine positive Korrelation zwischen TS-Gehalt und Trockensubstanzdichte sowie einen negativen Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Partikellänge und der erzielten Trockensubstanzdichte. Bei hohen TS-Gehalten von über 40 % wirkte sich eine gesteigerte Partikellänge (theoretische Häcksellänge 5,5; 15 und 21 mm) besonders stark auf die zu erzielende Dichte aus und lag bei der 21 mm-Variante um bis 25 % unter den Werten der 5,5 mm gehäckselten Proben (LEURS, 2006).

### 2.2.3.1 Lagerungsdichte in Folienschläuchen

In einer von MUCK und HOLMES (2002) durchgeführten Studie zu Lagerungsdichte und Silierverlusten im Folienschlauch wurden 25 Schlauchsilos auf Praxisbetrieben untersucht. Die Silagen wurden mit zwei verschiedenen Schlauchpressen (AG-BAG G 7000 und KELLY-RYAN DLX) in Schläuche von 2,70 m Ø gepresst. Die Bestimmung der durchschnittlichen Lagerungsdichte im Schlauch wurde unter Verwendung einer näherungsweise Volumenberechnung und Wiegung der eingelagerten Siliergutmasse durchgeführt.

Eine über die Schlauchquerschnittsfläche differenzierte Messung der Lagerungsdichte wurde durch die Entnahme von Bohrkernen an sieben Positionen realisiert. Für die Beprobung wurde der unter 2.2.3 beschriebene Bohrstock eingesetzt. Die Entnahmepositionen an der Anschnittfläche sind in Abb. 10 dargestellt.



**Abbildung 10: Beprobungspositionen an der Anschnittfläche der Siloschläuche**  
(mod. nach MUCK und HOLMES, 2002)

Die durchschnittlichen Trockensubstanzdichten der 11 untersuchten Grassilagen lagen zwischen 206 und 233 kg TS m<sup>-3</sup> bei hohen TS-Gehalten von 44 bis 48 %. Bei den Maissilagen lagen die Lagerungsdichten mit 167 bis 246 kg TS m<sup>-3</sup> in einer größeren Spanne, obwohl die TS-Gehalte der Silagen alle zwischen 36 und 40 % lagen. Ein Vergleich zwischen Silagen der jeweiligen Presstechnik ergab, dass die mit der AG BAG-Maschine gepressten Schlauchsilos im Durchschnitt eine um 8 % höhere Dichte aufwiesen als die der KELLY-RYAN-Maschine, wobei zu beachten ist, dass die Unterschiede eventuell im Erntegut begründet sind. Es wurden weiterhin erhebliche Abweichungen der Lagerungsdichte von über 10 % bei vergleichbarem Siliergut, gleicher Maschine, jedoch anderem Bediener festgestellt, was einen erheblichen Einfluss des Maschinenbedieners auf die Pressdichte vermuten lässt (MUCK und HOLMES, 2002).

### **2.3 Technische Lösungen zur Verdichtung von Siliergütern**

Für die Futterkonservierung mit Hilfe der Silierung bestehen mit der Einbringung in Großsilos (Flachsilos und Hochsilos) und dem Ballenverfahren zwei grundsätzlich verschiedene Verfahrensansätze. Beim Hoch- und Flachsiloverfahren werden die Siliergüter als Schüttgut transportiert und im Silo verdichtet, während im Fall der Futterbergung mit Aufsammlerpresse das Siliergut direkt auf dem Feld verdichtet, verpackt und anschließend unter besserer Auslastung der Transportfahrzeuge transportiert wird (MORIZ, 2008).

Die Konservierung im Folienschlauch ist keinem der beiden Verfahrenansätze direkt zuzuordnen, da der Ablageort zwar flexibel ist, das geschlossen gelagerte Siliergut jedoch nicht transportiert werden kann.

Während die Verdichtung im Hochsilo durch die Autokompression der Eigenmasse der Siliergutsäule erfolgt, ist bei allen anderen Verfahren eine aktive Verdichtung des Siliergutes erforderlich. Der Verfahrensablauf der Silierguteinbringung im Flachsilo ist in 2.1.2 beschrieben. Durch das Überfahren der Silage mit einem Walzfahrzeug wird die Gewichtskraft ( $m \cdot g$ ) auf das Siliergut unter den Reifen übertragen, wobei im Siliergut senkrechte Kräfte und solche in Längs- und Querrichtung entstehen. Nach PIRKELMANN (1988) kann aus der Druckverteilung im Boden auf ähnliche Vorgänge im Siliergut geschlossen werden. Die Zusammenhänge zwischen Radlast, Aufstandsfläche, Reifeninnendruck und der Druckverteilung im Boden sind in Abb. 11 dargestellt.

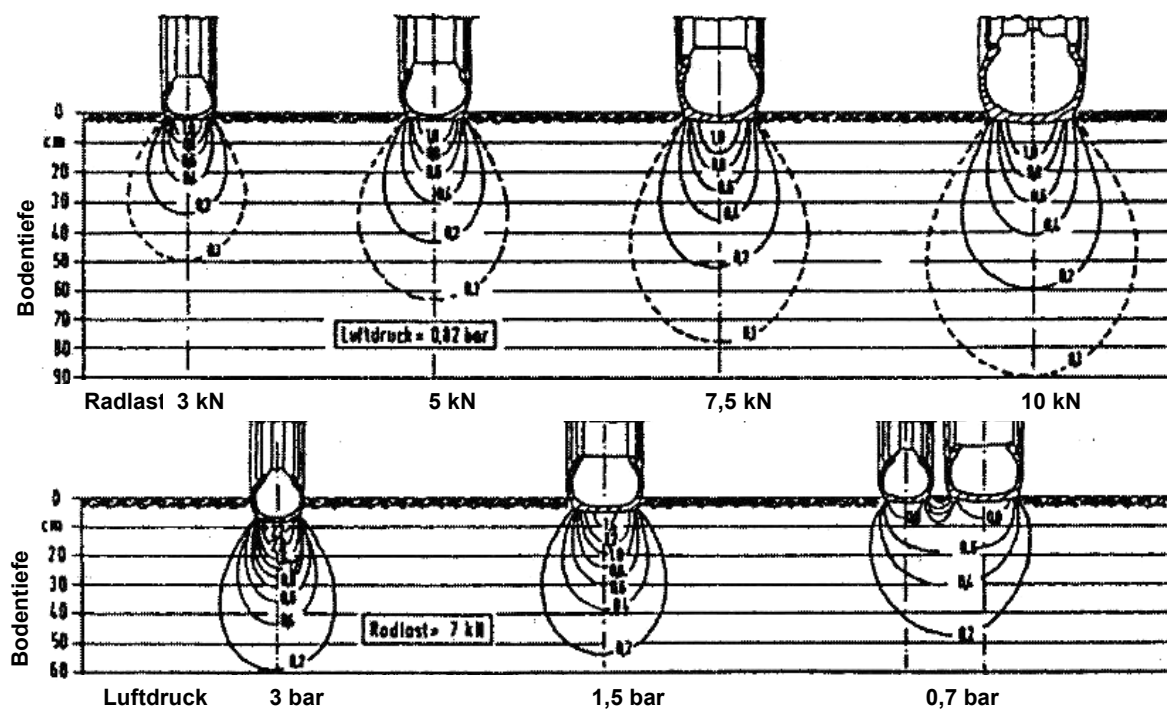


Abbildung 11: Einfluss der Radlast und des Kontakflächendruckes auf die Tiefenwirkung des Bodendruckes (SÖHNE, 1952)

Aus Abb. 11 ist zu entnehmen, dass ein Erhöhen der Radlast durch Ballastieren des Walzschleppers sowie ein höherer Reifeninnendruck die Tiefenwirkung verbessern, wohingegen eine Vergrößerung der Aufstandsfläche durch Zwillingsreifen zu geringerer Tiefenwirkung führt.

Eine Definition von Verdichtung des Bodens nach SEMMEL und HORN (1995) beschreibt diese als durch externe Belastungen (Befahrung, Tritt) oder interne Belastungen (Quellung, Schrumpfung) verursachte Überschreitung der Strukturstabilität, die zu einer Verschiebung und Neuordnung der Bodenpartikel führt. Die Bodenpartikel rücken näher zusammen, wodurch sich eine Erhöhung der Lagerungsdichte bei verringertem Porenvolumen einstellt. Die engere Lagerung der Bodenpartikel führt zu einer besseren gegenseitigen Abstützung und erhöht somit die Tragkraft des Bodens. Laut SÖHNE (1952) nimmt die Verdichtbarkeit mit steigendem Feuchtegehalt zu.

Diese Vorgänge sind grundsätzlich auf die Verdichtung von Silage im Flachsilo übertragbar, wobei sich Siliergut als organisches Material vor allem in der Elastizität von Boden erheblich unterscheidet. Die Zeitspanne der Kompression des Siliergutes durch den überfahrenden Reifen ist nur kurz, weshalb es bei Entlastung wieder zurückfedert und sich die Dichtlagerung in Folge der Expansion wieder verringert. Hierauf wird in Kap. 2.4 genauer eingegangen. Als Durchschnittswert für die spezifische Verdichtungszeit werden 2 bis 3,5 Traktorminuten je Tonne Originalsubstanz für eine ausreichende Verdichtung gefordert (DLG, 2006 und FÜRLI et al., 2007). Das von MUCK und HOLMES (2002) entwickelte Modell zur Vorhersage der erzielbaren Lagerungsdichte bei der Flachsiloüberdichtung berücksichtigt neben Walzschleppergewicht, prozentualer Verdichtungszeit, einzulagerndem Massestrom, Silo- und Siloseitenwandhöhe auch den Trockensubstanzgehalt des Siliergutes sowie die zu verdichtende Schichtdicke.

Neben Traktoren und Radladern werden auf einigen Großbetrieben auch Vibrationswalzen aus dem Straßenbau zur Siloüberdichtung mit Erfolg eingesetzt (HÄBLER et al., 2008). Bei einer begleitenden Untersuchung auf Praxisbetrieben wurden mit einer 12,2 t Vibrationswalze ein Massenstrom von durchschnittlich 122 t Frischsubstanz Silomais je Stunde eingelagert. Dies entsprach nur etwa 20 bis 33 % der Verdichtungszeit, die für eine Walzschlepperverdichtung gefordert wird. Dabei lagen bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 36 % die erzielten Lagerungsdichten mit 250 bis 275 kg TS m<sup>-3</sup> im Sollbereich, sodass von einer guten Verdichtungsarbeit ausgegangen werden konnte. Bei Eingabe der entsprechenden Parameter in das Vorhersagemodell von MUCK und HOLMES (2002) wurden

nur erzielbare Lagerungsdichten von 160 bis 169 kg TS m<sup>-3</sup> erwartet. Die Vergleichbarkeit ist allerdings eingeschränkt, da im Versuch von HÄBLER et al. (2008) eine durchschnittliche Lagerungsdichte über das ganze Silo berechnet wurde, während im Modell die Dichte bei einer Überlagerungshöhe von 1,3 m angegeben wurde. Da die von HÄBLER et al. (2008) untersuchten Silos eine Höhe von über 5 m aufwiesen, ist davon auszugehen, dass die durchschnittliche Lagerungsdichte höher war als diejenige 1,3 m unter der Silooberfläche.

Um die Wirkung des Vibrationseffektes zu testen, wurde im gleichen Silo parallel eine Hälfte mit und eine Hälfte ohne Vibration verdichtet. Die Frequenz der Vibration betrug 30 Hz bei einer Amplitude von 1,9 mm. Bei den drei durchgeführten Wiederholungen war in jeder ein positiver Effekt der Vibration festzustellen. Die Ergebnisse eines direkten Vergleichs zwischen Traktor- und Vibrationswalzenverdichtung stehen noch aus.

Für die Verdichtung von organischen Stoffen in Aufsammlern sind mit dem Normaldruckverfahren und dem Radialdruckverfahren zwei grundsätzlich verschiedene Prinzipien bekannt (Abb. 12).

Aufsammlern							
Radialdruckpressen				Normaldruckpressen			
Radialdruck –Strangpressen		Radialdruck –Rollpressen (Rundballenpressen)		Normaldruck –Strangpressen		Normaldruck –Kastenpressen	
Wickel- brikettier- pressen	Compact- rollen- pressen	Vario- kammer- pressen	Konstant- kammer- pressen	Kolben- pressen	Brikettier- pressen	Kolben- pressen	Brikettier- pressen

Abbildung 12: Gliederung der Aufsammlern nach Wirk- und Funktionsprinzipien in der Landtechnik (JOHANNING, 2000)

Im Fall des Normaldruckverfahrens erfolgt die Verdichtung durch einen oszillierenden Presskolben, der das Gut portionsweise in einer Presskammer komprimiert. Bei der Ausführung der Presskammer wird das Kastenprinzip vom Strangpressprinzip unterschieden. Ersteres besitzt eine starre Rückwand, die den Gegendruck zum Presskolben bildet, während beim Strangpressprinzip der Gegendruck durch die Wandreibung des Pressstranges



im Kanal erzeugt wird (HARMS, 1994). Der unterschiedliche qualitative Verlauf des Verdichtungsdruckes am Presskolben  $p_K$  über dem Kolbenweg  $s_K$  ist für beide Pressprinzipien in Abb. 13 schematisch dargestellt.

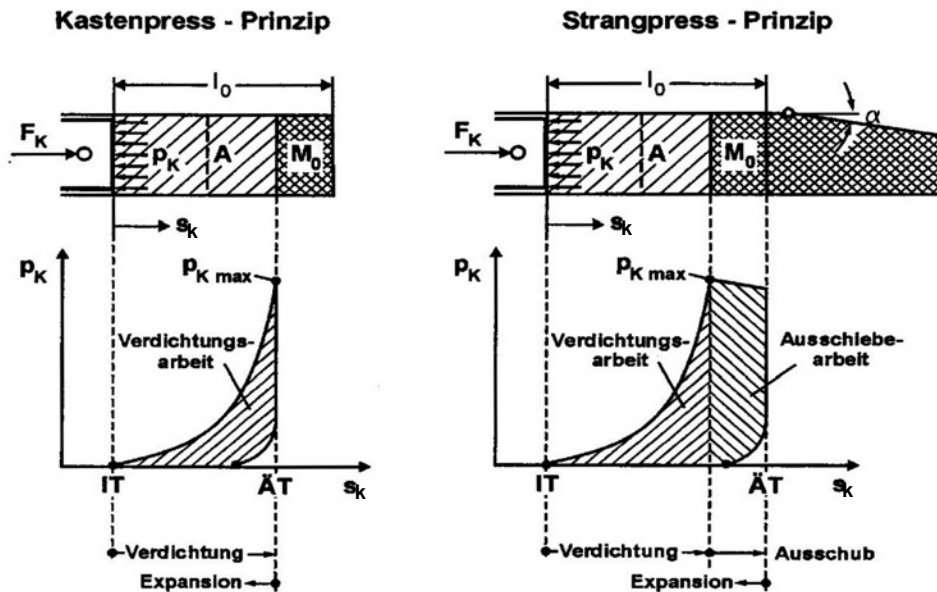
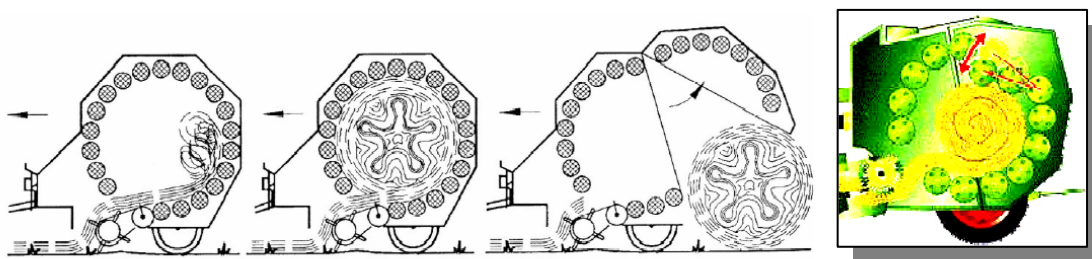


Abbildung 13: Qualitativer Verlauf des Verdichtungsdruckes  $p_K$  über dem Kolbenweg  $s_K$  für die unterschiedlichen Verdichtungsprinzipien der Normaldruckverdichtung (WOLF-REGETT, 1989)

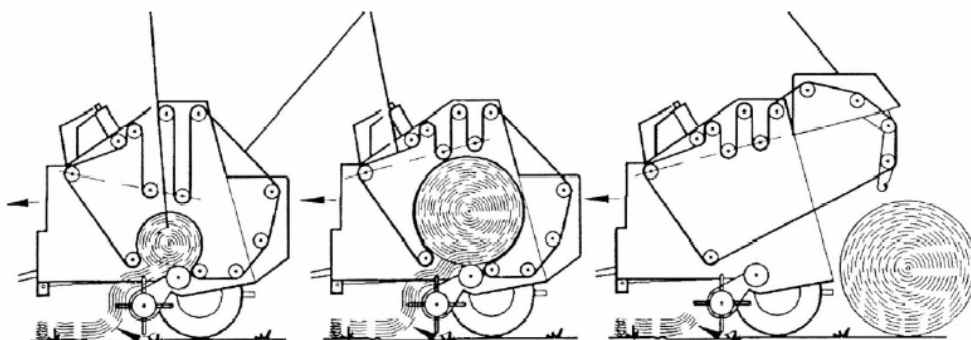
Bis zum Erreichen des maximalen Kolbendruckes  $p_{Kmax}$  weisen beide Verdichtungsprinzipien den gleichen Anstieg über dem Weg  $s_K$  auf, wobei sich im Fall des Kastenprinzips der Kolben bei  $p_{Kmax}$  auch gleichzeitig auf dem äußeren Totpunkt ÄT befindet, während die Kolbenkraft am Punkt  $p_{Kmax}$  beim Strangpressprinzip mit der Gesamtreibungskraft des Pressstranges im Kanal gleichzusetzen ist. Auf dem Restweg bis ÄT wird das Presspaket bei leicht sinkender Kolbenkraft infolge der Gleitreibung in Pressrichtung ausgeschoben. Der Kolbenrücklauf erfolgt bei beiden Verfahren drucklos. Die heutigen Quaderballenpressen arbeiten alle nach dem Strangpressprinzip, welches vor allem den Vorteil der kontinuierlichen Arbeit ohne Unterbrechung beim Binden des Ballens bietet. Bedingt durch die starken Reibungskräfte an der Ober- und Unterseite der Presskammer, deren Durchgangshöhe sich in Richtung Kanalausgang verringert, ist die Expansion des Pressgutes im mittleren Ballenbereich größer. Die unter Verwendung des radiometrischen Dichtepfandes ermittelte Dichteverteilung über einen Quaderballen (Kap. 2.5.2, Abb. 21) zeigt deshalb im oberen und unteren Randbereich eine höhere Dichte.

Die für die Ballensilageherstellung weit verbreiteten Radialdruckballenpressen sind grundsätzlich in Festkammer- und Variokammerpressen zu unterteilen (BÖNIG, 2006). Bei ersterer ist die Ballengröße auf einen Durchmesser konstruktiv festgelegt, wohingegen im Fall von Variokammerpressen der Ballendurchmesser in bestimmten Grenzen frei gewählt werden kann. Festkammerpressen sind mit Presswalzen oder Stabketten ausgerüstet, die auf dem äußeren Umfang der Presskammer angeordnet sind (Abb. 14), wobei bei einem verbesserten Festkammersystem drei Presswalzen an einem Ausleger nach innen geschwenkt werden, um eine stärkere Verdichtung des Ballenkerns zu erreichen.



**Abbildung 14: Arbeitsweise einer Rundballenpresse mit fester Kammergröße und Presswalzen (links); Presse mit einschwenkendem Ausleger (rechts) (BÖNIG, 2006)**

Für die Umsetzung der Ballenverdichtung mit einer variablen Presskammer werden geführte umlaufende Stabketten oder Bänder eingesetzt, die den Ballenumfang schon fast zu Beginn der Pressung umschließen und sich dem im Verlauf größer werdenden Ballen anpassen.



**Abbildung 15: Ballenaufbau in einer Rundballenpresse mit variabler Presskammer (BÖNIG, 2006)**

Diese Arbeitsweise ermöglicht neben einer wirkungsvollen Verdichtung des Ballenkerns auch die Einstellung der Ballengröße. Die Dichteverteilung eines auf diese Weise gepressten Rundballens ist in Kap. 2.5.2, Abb. 22 dargestellt. Die Zuführung von Pressgut über die Pick-up in den äußeren Teil des Pressraums und die Drehung des Ballens führt zu Radialkräften  $F_R$  auf die Presswerkzeuge. Das Pressgut wird während des Aufrollens über den Ballenumfang von außen verdichtet. Bedingt durch die kontinuierliche Zuführung des Pressgutes in vergleichsweise dünner Schichtdicke und dessen teilweise Längsausrichtung ermöglicht im Vergleich zum Normaldruckverfahren geringere maximale Pressdrücke bei vergleichbarer Gutverdichtung.

Die maximal mögliche Verdichtung ist beim Rundballenverfahren jedoch geringer als bei Quaderballenpressen. Speziell auf hohe Verdichtung entwickelte Kompaktrollenpressen bilden hier eine Ausnahme (JOHANNING, 2000). Diese Geräte arbeiten aber nicht mit parallel ausgerichteten Presswalzen, Stabketten oder Bändern, sondern mit geschränkt zueinander stehenden Presswalzen, die einen konisch zulaufenden Pressraum bilden (WESCHE, 1995). Auf diese Weise wird eine stark verdichtete Endlosrolle gewickelt und gleichzeitig in axialer Richtung aus dem Pressraum bewegt. Zur Trennung des Pressstranges in einzelne Ballen ist eine Abtrennvorrichtung neben der Presskammer notwendig. Das Verfahren ist aber aufgrund technischer Probleme vor allem mit der Trennvorrichtung nicht bis zur Serienreife entwickelt worden.

## **2.4 Verdichtungseigenschaften von Siliergütern**

Das für eine Silierung bestimmte Schüttgut besteht aus den drei Fraktionen: organische Trockensubstanz, Wasser und dem mit luftgefüllten Porenvolumen (REES et al., 1983). Wie in Kap. 2.2 beschrieben, ist es für eine erfolgreiche Silierung notwendig, den Anteil des Porenvolumens und der darin enthaltenen Luft bestmöglich zu minimieren. Der jeweilige Anteil der Volumenfraktionen vor der Verdichtung variiert je nach Siliergut, aber auch innerhalb eines Siliergutes in einem großen Streubereich. Zuckerrübenpressschnitzel weisen z.B. nur TS-Gehalte von 20 bis 28 % bezogen auf die Gesamtmasse auf, wohingegen bei Feuchtmais TS-Gehalte von über 70 % vorkommen. Der Porenvolumenanteil im Schüttgut ist wesentlich von der Partikelgrößenverteilung gekennzeichnet. Ein stärker zerkleinertes Siliergut besitzt im direkten Vergleich eine höhere Schüttdichte und ein geringeres Porenvolumen (BÖNIG, 2006).

Ein weiteres wichtiges Merkmal für die Schüttdichte ist die Steifigkeit der Partikel, die, wie die Rückstellkräfte, vom Rohfasergehalt und vom TS-Gehalt des Siliergutes abhängig sind (DERNEDDE, 1983). Die Einflussfaktoren Partikelgröße, TS-Gehalt und Rohfasergehalt beeinflussen genauso wie die Schüttdichte die Verdichtbarkeit bei allen Siliergütern. Für Silomais sind aus siliertechnischer Sicht Rohfasergehalte  $< 200 \text{ g/kg TS}$  anzustreben (HERTWIG, 2004). Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass dieses Häckselgut aus morphologisch sehr verschiedenen Pflanzenteilen (Körner, Spindeln, Restpflanze) zusammengesetzt ist, die unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen (KROMER, 1993). Besonders der Reifegrad und der Kornanteil beeinflussen neben der Verdichtbarkeit auch die erzielbare Lagerungsdichte. Während die Verdichtbarkeit vor allem von den Eigenschaften der Restpflanze abhängt, ist die absolute Lagerungsdichte in großem Maße durch den Kornanteil bestimmt (DERNEDDE und HONIG, 1977).

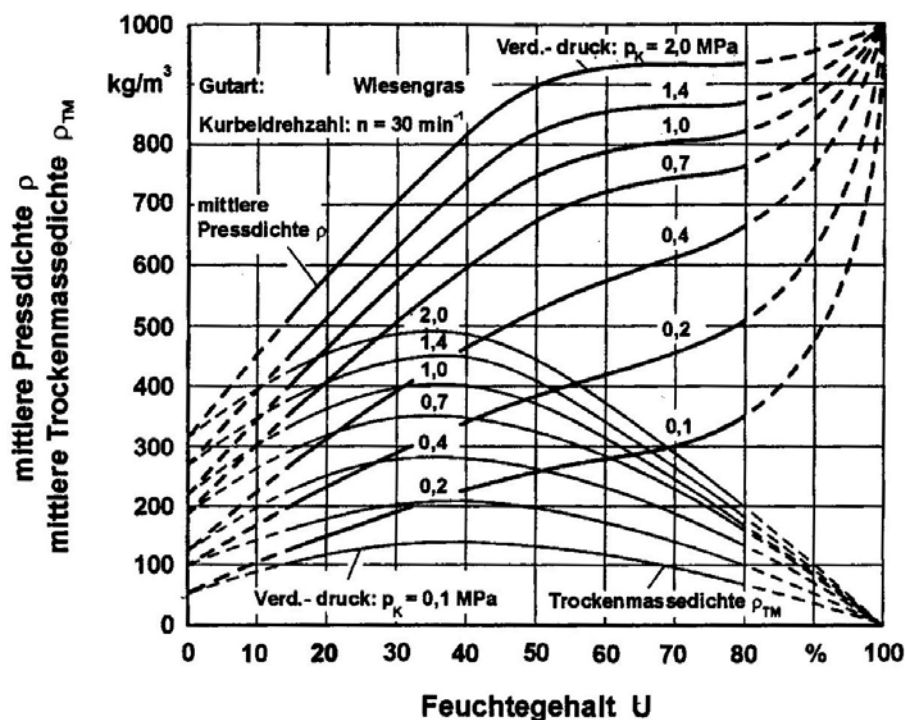


Abbildung 16: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die erreichbare mittlere Pressdichte bei unterschiedlichem Verdichtungsdruck für Wiesengras (SACHT, 1966)

Verdichtungsversuche unter Variation des TS-Gehaltes eines Siliergutes haben ergeben, dass die maximal erzielbaren Trockensubstanzdichten bei Grashäckselgut im Bereich von 60 bis 70 % TS-Gehalt liegen (Abb. 16). Dies ist auf die in der angegebenen Spanne geringste Biegesteifigkeit von Halmgut zurückzuführen (SACHT, 1966; WIENECKE, 1956).

Hingegen sind die, bezogen auf die Originalsubstanz im für die Futterkonservierung relevanten Druckbereich, bei niedrigen TS-Gehalten erzielbaren Lagerungsdichten höher, womit auch ein geringeres Porenvolumen einhergeht. Erst bei sehr hohen Verdichtungsdrücken  $>10$  MPa übersteigen die Originalsubstanzdichten von Siliergut mit hohem TS-Gehalt die von solchem mit niedrigerem TS-Gehalt. Dies begründet sich daraus, dass bei solch hohen Drücken so gut wie kein Porenvolumen mehr im Gut verbleibt und die Festsubstanzdichte der Trockensubstanz mit ca.  $1.450 \text{ kg m}^{-3}$  deutlich höher ist als die von Wasser (BÖNIG, 2006).

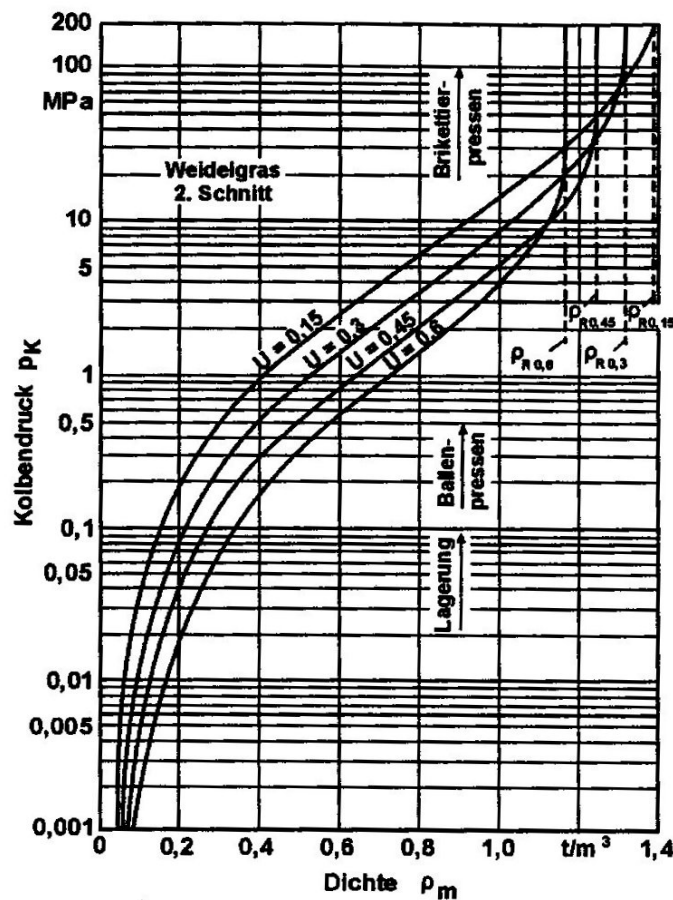


Abbildung 17: Verdichtungsfunktionen für Weidelgras mit unterschiedlichem Feuchtegehalt  $U$  im gesamten Druckbereich (BÖNIG, 2006)

Die Häcksellänge, und damit die Partikelgrößenzusammensetzung, beeinflusst die Verdichtbarkeit von Siliergütern in verschiedener Hinsicht. Mit abnehmender Partikelgröße können Hohlräume besser genutzt werden und die Partikel sind leichter gegeneinander verschiebbar, was die Verdichtung erleichtert (LEURS, 2005). HONIG und ROHR (1982) stellten im Fall von Maishäckselgut eine klare Abstufung der unter gleichen Bedingungen erzielbaren Lagerungsdichten fest. Der Einfluss der Häcksellänge nahm mit zunehmendem

TS-Gehalt zu. Während die Lagerungsdichte bei einem TS-Gehalt von 27 % und einer theoretischen Häcksellänge von 4 bzw. 14 mm um 11 % abnahm, verringerte sich diese bei einem TS-Gehalt von 36 % um 15 % (HONIG und ROHR, 1982). Daraus lässt sich schließen, dass mit zunehmender Partikellänge Steifigkeit und Rückstellkraft einen größeren Einfluss auf die Verdichtbarkeit haben (LEURS, 2006).

Besonders im Hinblick auf die Verdichtung von Siliergütern im Folienschlauch ist die innere Reibung von Siliergütern von entscheidender Bedeutung. Bei diesem Verfahren wird das Siliergut auf einer Ebene in den Presstunnel gedrückt und muss sich von dort aus bei gleichzeitiger Verdichtung nach oben und zur Seite ausbreiten. Die innere Reibung ist vom Siliergut, der Partikelgröße sowie dem TS-Gehalt abhängig und lässt sich aus dem Schüttwinkel ableiten (HOFFMANN, 1975). Für Siliergüter gilt, dass die innere Reibung mit zunehmender Partikellänge und zunehmendem TS-Gehalt steigt. Der Vergleich von zwei Schlauchsilagen mit Silomais von 5,5 bzw. 21 mm theoretischer Häcksellänge der gleichen Erntegutpartie zeigte mit Lagerungsdichten von 219 bzw. 188 kg m<sup>-3</sup> einen deutlichen Einfluss der Partikelgröße.

## **2.5 Dichtemessverfahren für Silage**

Für die Bewertung der Verdichtung, die bei einem Silierverfahren erreicht wird, ist es notwendig die Lagerungsdichte eines Siliergutes im Silo mit möglichst hoher Genauigkeit zu messen. Hierfür sind Methoden erforderlich, mit denen nach abgeschlossenem Silierprozess die Lagerungsdichte an verschiedenen Positionen verteilt über das Silo gemessen werden kann. Um jedoch noch während der Einlagerung Einfluss auf die Intensität der Siliergutverdichtung nehmen zu können, muss die Lagerungsdichte während des Einlagerungsprozesses gemessen werden, was Verfahren, bei denen punktuell Proben entnommen werden müssen, ausscheiden lässt.

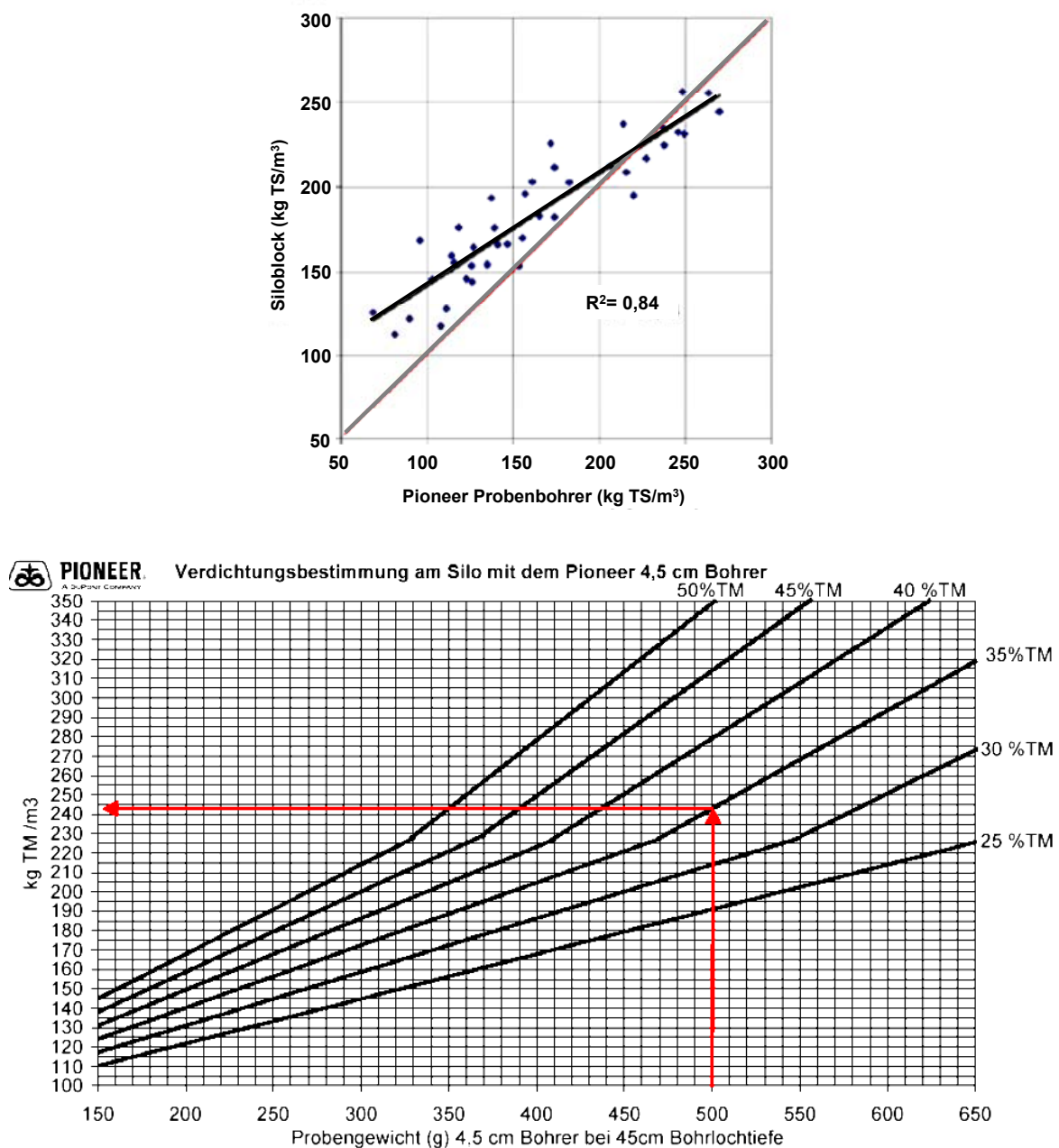
Für die Bestimmung der Lagerungsdichte nach dem Silierprozess stehen grundsätzlich zwei bewährte Messprinzipien zur Verfügung. Dies sind zum einen die Massenbestimmung einer Silageprobe eines definierten Volumens und zum anderen die radiometrische Dichtemessung. Andere Messprinzipien, wie Mikrowellenradarmessung und die Messung des Eindringwiderstandes mittels Penetrometer, brachten bisher nur zum Teil zufriedenstellende Ergebnisse (FÜRL, 2008).

### 2.5.1 Masse und Volumenbestimmung

Zur Entnahme einer Silageprobe mit definiertem Volumen können verschiedene Techniken mit sehr unterschiedlichen Probevolumina eingesetzt werden. Bei Verwendung eines Blockschneiders (SPIEKERS, 1998) als Probenentnahmegerät werden ganze Siloblocke aus einem Fahrsilo entnommen, deren Volumen vermessen und die Blockmasse auf einer geeigneten Fuhrwerkswaage bestimmt. Die Blöcke können nach außen hin nahezu zerstörungsfrei entnommen werden, sodass von den Schnittkanten selbst kein nennenswerter Fehler bei der Probenahme ausgeht. Es ist besonders darauf zu achten, dass die Anschnittfläche vor der Entnahme eben und senkrecht ist und ein senkrecht stehender Block ausgeschnitten wird. Zur genauen Einstellung des Blockschneiders ist ein hydraulischer Oberlenker von Vorteil. Bröckelverluste am Siloblock müssen mit verwogen werden. Für die Berechnung der Trockensubstanzdichte ist die zusätzliche Bestimmung des TS-Gehaltes von Proben des Siloblockes erforderlich. Unter Verwendung der Blockschneidermethode kann die durchschnittliche Lagerungsdichte über die Höhe, Breite und Tiefe des gesamten Blockes relativ genau bestimmt werden. Über die Breite und vor allem die Höhe können jedoch die Lagerungsdichten im Block stark differieren, was bei dieser Methode nicht erfasst werden kann. Hierfür ist die Messung in einem engeren Messraster erforderlich.

Wenn die Beprobung am geöffneten Silo senkrecht zu dessen Anschnittfläche erfolgen soll, werden elektrisch oder manuell betriebene Bohrstöcke eingesetzt. Ziel dieser Methode ist ebenfalls die Entnahme eines definierten Silagevolumens, anhand dessen die Lagerungsdichte und der TS-Gehalt der Probe bestimmt werden. Durch Auswahl eines gezielten Probeentnahmемusters ist es bei dieser Methode möglich, die Lagerungsdichte am Praxis-silo über die gesamte Anschnittfläche abzubilden und so die Unterschiede im Siloquerschnitt besser zu erfassen (THAYSEN, 2006). Je nach Durchmesser des Bohrstockes und vorgegebener Beprobungstiefe ist das Probevolumen sehr verschieden. Bei manuellem Betrieb ist der Bohrkronendurchmesser jedoch aufgrund des nötigen Antriebmomentes begrenzt. Für die Dichtebestimmung an Praxissilagen wurde ein handbetriebener Probenbohrer mit 45 mm Kronendurchmesser und 450 mm Beprobungstiefe entwickelt (KLEINMANS et al., 2005). Bei dessen Kalibrierung hat sich herausgestellt, dass vor allem bei niedriger Silagedichte diese erheblich unterschätzt wird. In Abb. 18 sind die Dichtewerte der Kalibrierversuche im direkten Vergleich zur Blockschneidermethode dargestellt. Bei Lagerungsdichten von über  $200 \text{ kg TS m}^{-3}$  stimmten die gemessenen Lagerungsdichten gut

mit den aus den Siloblöcken ermittelten überein, während bei tatsächlichen Dichten von 150 bis 200 kg TS m<sup>-3</sup> die Messwerte der Bohrkernmethode um bis zu 30 % niedriger waren. Dieser Messfehler liegt vermutlich an der Verdrängung von Material vor der Schneidkrone nach außen hin, sodass dieses nicht in vollem Umfang in den Bohrstock aufgenommen wird. Um den Messfehler auszugleichen, wurden die in Abb. 18 unten dargestellten Korrekturkurven ermittelt, auf denen bei bekanntem TS-Gehalt der Silage die Lagerungsdichte nach Verwiegung des Bohrkernes abzulesen ist.



**Abbildung 18:** Vergleich der gemessenen Lagerungsdichten des Pioneer Probenbohrers mit denen der Siloblockmethode (oben) und Korrekturtablette für die Dichtewerte des Probenbohrers (unten) (THAYSEN, 2008a)



Durch Veränderung der Steigung der Geradengleichung für Lagerungsdichten unter  $220 \text{ kg TS m}^{-3}$  werden die Messwerte nach oben korrigiert und so der Messfehler ausgeglichen.

Die Beprobung von noch geschlossenen Silos ist nur durch eine Probennahme senkrecht zur Silooberfläche möglich, da noch keine offene Anschnittfläche vorhanden ist. Die Firma Paus entwickelte hierfür zusammen mit der LUFA Bonn das Probenentnahmegesetz „Siloboy“, welches im Landwirtschaftszentrum Haus Riswick getestet wurde. Das Gesetz besteht aus zwei Rammkernsonden mit Durchmessern von 30 bzw. 40 mm, die jeweils mit einem Schneidkopf aus gehärtetem Werkzeugstahl ausgestattet sind. Die Beprobung von Grassilage kann mit beiden Sonden durchgeführt werden, während bei Mais die 40 mm Version einzusetzen ist. Zur Probennahme wird die Sonde mit einem Polyamidhammer in die Silage getrieben und dabei das vor dem Schneidkopf befindliche Material in diese aufgenommen. Das Herausziehen des Bohrstockes erfolgt mittels eines an einem fahrbaren Gestell angebrachten Kettenzuges. Die Einstichtiefe ist anschließend genau zu vermessen, um das Probevolumen zu ermitteln. Mit dieser Methode kann vor allem der obere, schwer zu verdichtende Siloabschnitt beprobt werden. Das Ergebnis stellt jedoch immer einen Mittelwert über die gesamte Beprobungstiefe dar. Bei allen zuvor beschriebenen Beprobungsmethoden errechnet sich die Lagerungsdichte nach folgenden Gleichungen:

**Gleichung 3:**  $\rho_{FM} = \frac{m_p}{V_p}$

**Gleichung 4:**  $\rho_{TS} = \frac{m_p \cdot \text{TS-Gehalt}}{V_p}$

Das Probevolumen  $V_p$  errechnet sich je nach Geometrie des Entnahmegesetzes:

**Gleichung 5:**  $V_p = H \cdot B \cdot L$  (Siloblock)

**Gleichung 6:**  $V_p = \pi \cdot r^2 \cdot L$  (Probenbohrer bzw. Rammkernsonde)

Im Fall des Pioneer Probenbohrers werden die ermittelten Dichten nach dem in Abb. 18 dargestellten Diagramm korrigiert.

### 2.5.2 Radiometrische Dichtemessung

Zur Messung der Rohdichte in Böden und Silagen können kerngeophysikalische Messungen unter Verwendung einer Rückstrahlsonde durchgeführt werden. Das hierbei als  $\gamma$ -Strahler verwendete Isotop Cs 137 sendet Strahlungen aus, die feste Körper durchdringen können (PATZOLD et al., 2007).

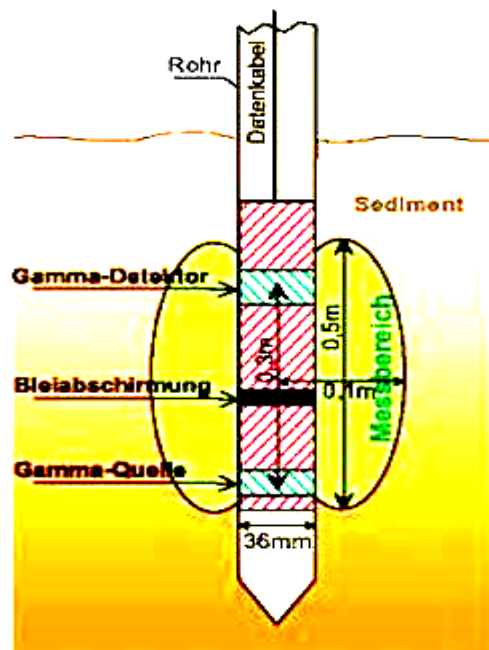


Abbildung 19: Rückstrahlsonde (Prinzipskizze) (PATZOLD et al., 2007)

Direkte Strahlung von der Quelle zum Detektor wird durch eine Bleiabschirmung verhindert. Je größer die Dichte des umgebenden Materials ist, desto stärker ist die zum Detektor zurückgestrahlte Energie, die in Zählraten registriert wird. Die Anzahl der pro Zeiteinheit eintreffenden  $\gamma$ -Teilchen am Detektor ist bei fixierten geometrischen Verhältnissen ein Maß für die Elektronendichte und damit auch ein Maß für die Dichte der durchstrahlten Materie. Das Materialvolumen, in dem die Rückstrahlung erfolgt, entspricht ungefähr einem Rotationsellipsoiden mit einem Radius von 0,1 m und einer Länge von 0,5 m. Die Methode gewährleistet nach erfolgter Kalibrierung eine sehr hohe Messgenauigkeit von  $\pm 1\%$ . Für die Dichtemessung an Praxissilos sind die aufgrund der Cäsiumquelle erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen und die ausschließliche Bedienung durch geschultes Personal ein erheblicher Nachteil.

Speziell für die differenzierte Dichtebestimmung von Rund- und Quaderballen wurde von der DLG ein Prüfstand entwickelt, der mobil und stationär eingesetzt werden kann. Bei dem Verfahren handelt es sich um eine radiometrische Dichtemessung, die auf der Abschwächung von Gammastrahlung infolge der Materialdurchdringung beruht. Die von einem Cäsium-137-Gammastrahler (5550 MBq) ausgesandte Strahlung wird von einem jenseits des Ballens befindlichen Detektor in elektrische Impulse umgewandelt. Die Abschwächung der Strahlung korreliert mit dem Abstand zwischen Strahler und Detektor, der Schichtdicke des zu prüfenden Materials und dessen Dichte. Da Abstand und Schichtdicke bekannt sind, verbleibt als einzige Unbekannte die Dichte, die sich aus dem Strahlenabschwächungsgesetz ableiten lässt. Diese Berechnung wird bereits durch eine integrierte Auswerteinheit vorgenommen. Der untersuchte Ballen wird durch die Strahlung weder verändert noch radioaktiv.

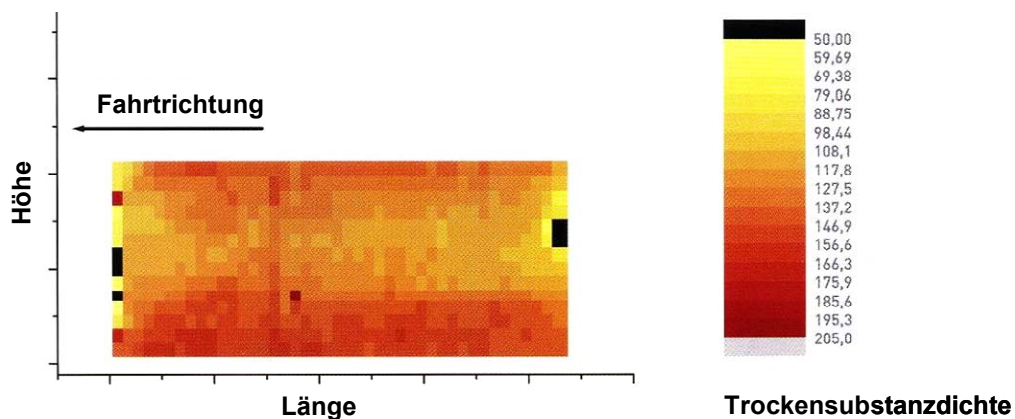


**Abbildung 20: Radiometrischer Ballendichteprüfstand mit Quaderballen (links) und Rundballen (rechts) (DLG e.V., 2008)**

Der Prüfstand, der auf einen 7,5 t LKW aufgebaut werden kann, besteht aus jeweils einer Ballenaufnahme für Rund- und Quaderballen, die für die Positionierung zur Messung gedreht bzw. gekippt werden können. Die aus einem Gitterrohrrahmen bestehende einseitig fixierte Messmimik kann in horizontaler und vertikaler Richtung bewegt werden. So besteht die Möglichkeit, den zu prüfenden Ballen in einem wählbaren Raster zu scannen. Die Steuerzentrale ist in einem klimatisierten Schaltschrank untergebracht und kommuniziert über eine drahtlose Ethernetverbindung mit dem Bedienteil, über das der Benutzer frei beweglich den Prüfstand steuern und die Messergebnisse verfolgen kann. Die Kalibrierung

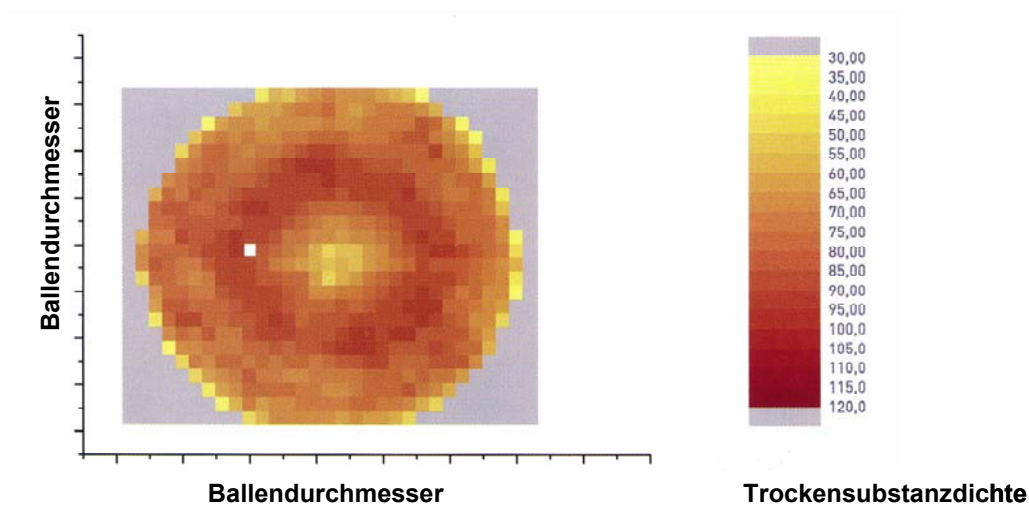
der kompletten Dichtemesskette erfolgt unmittelbar vor Beginn der Messung unter Verwendung von Kalibrierrohren bekannter Länge und Dichte.

Zur Auswertung der Messergebnisse werden die im Raster gemessenen Lagerungsdichten in einem x/y-Koordinatensystem graphisch dargestellt. Bei einem Messraster von 5 x 5 cm entsteht so eine detaillierte Abbildung der Lagerungsdichte im horizontalen und lateralen Schnitt des Ballens.



**Abbildung 21: Lateraler radiometrischer Scann der Ballenseite eines Strohballens (5\*5 cm Rezeptur) (DLG e. V., 2008)**

Das Scannen von Rundballen erfolgt in axialer Richtung, sodass die Lagerungsdichte des Ballens vom Kern bis zum äußeren Ballenmantel dargestellt werden kann (Abb. 22).



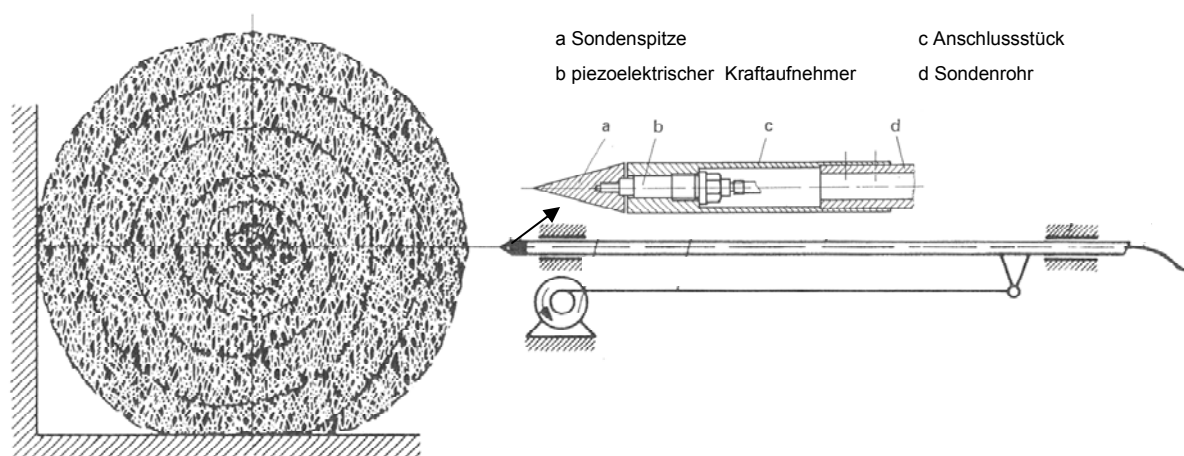
**Abbildung 22: Axialer radiometrischer Scann eines Strohballens (5\*5 cm Rezeptur) aus variabler Presskammer (DLG e.V., 2008)**

In Abb. 22 sind deutliche Dichteunterschiede vom Ballenkern zum Ballenmantel zu erkennen. Die Lagerungsdichte nimmt vom weichen Ballenkern nach außen zu, wobei die maximale Dichte im Bereich des halben Ballenradius erzielt wird. Zum Ballenmantel fällt die Lagerungsdichte wieder deutlich ab.

Der Prüfstand ist in erster Linie für Untersuchungen im Forschungs- und Entwicklungssektor vorgesehen. Durch die hohe Messgenauigkeit und die kleinräumige Auflösung sind Vergleiche der absoluten Lagerungsdichte sowie der Dichteverteilung möglich (UHRFELL, 2008).

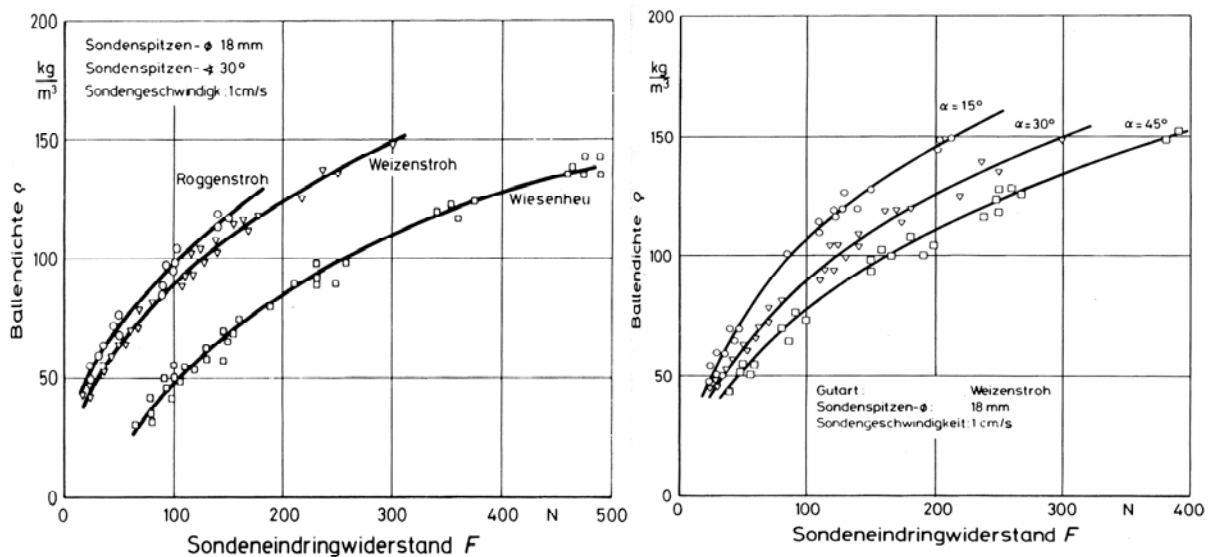
### 2.5.3 Messung der Lagerungsdichte mit dem Spitzendrucksondierungsverfahren

Die Methode der Spitzendrucksondierung stammt aus den Bodenwissenschaften und beruht auf der Messung der Eindringkraft eines Konus von definierter Querschnittsfläche und Kegelspitzwinkel (HESSE et al., 1978). Für verschiedene zu beprobende Partikelgemische, die stark differierende Widerstandsniveaus aufweisen, werden unterschiedliche Messkonusse eingesetzt. Die Eindringkraft ist von folgenden physikalischen Eigenschaften des Gutes abhängig: Partikelgröße, Partikelhärte, innere Reibung im Material, Lagerungsdichte und Gutfeuchte. Seitens der eingesetzten Messsonde sind vor allem deren Querschnittsfläche und der Kegelspitzwinkel entscheidend für die erforderliche Eindringkraft. In Abb. 23 ist der Aufbau einer Sondenspitze mit piezoelektrischem Kraftaufnehmer dargestellt.



**Abbildung 23: Aufbau einer Spitzendrucksondierungseinrichtung mit vergrößert dargestellter Messsonde (mod. nach HESSE et al., 1978)**

Die Kegelspitze ist aufgeschraubt und kann einfach gegen andere Spitzen mit verschiedenen Spitzwinkeln getauscht werden. Für die Dichtemessung in Rundballen wird die Messlanze mit konstanter Geschwindigkeit quer zur Drehachse des Ballens durch diesen hindurch geschoben und die auf die Kegelspitze wirkende Kraft über den Weg aufgezeichnet. Um jedoch die Lagerungsdichte durch die Messung der Eindringkraft bestimmen zu können, ist eine Kalibrierung der Kraftwerte mit realen Dichtewerten für das entsprechende Gut erforderlich. In Versuchen hat sich ergeben, dass die Lagerungsdichte in Rundballen unterproportional mit der Sondeneindringkraft ansteigt. In Abb. 24 sind Kalibrierkurven für Roggenstroh, Weizenstroh und Wiesenheu dargestellt.



**Abbildung 24: Zuordnung der Lagerungsdichte zum Eindringwiderstand für verschiedene Halmgüter (links) und Vergleich verschiedener Sondenspitzwinkel (rechts) (HESSE et al., 1978)**

Der Einfluss des Kegelspitzwinkels wurde durch die Verwendung verschiedener Kegelspitzen im selben Ballengut ermittelt. Entsprechend der Erwartungen führen kleinere Spitzwinkel zu geringeren Sondeneindringkräften, wohingegen stumpfe Kegelspitzen mit großen Spitzwinkeln sehr ungleichmäßig eindringen und größere Kräfte benötigen. Die Positionsbestimmung in Längsrichtung der Spitze wird mit kleinerem Spitzwinkel jedoch ungenauer, da diese selbst länger wird. Als günstig hat sich ein Spitzwinkel von  $30^\circ$  herausgestellt.

Der Einfluss des Sondendurchmessers auf die Eindringkraft ist nicht, wie zu vermuten, proportional zur Sondenquerschnittsfläche. Versuche mit Sondendurchmessern von

18 bzw. 24 mm Durchmesser führten zum Ergebnis, dass die benötigten Eindringkräfte überproportional zunehmen (HESSE et al., 1978).

Für den mobilen Einsatz wurden Handgeräte entwickelt, bei denen die erforderliche Eindringkraft vom Bediener direkt aufzubringen ist. Die Eindringtiefe und die Vorschubgeschwindigkeit werden über Ultraschallsensoren kontrolliert. Eine integrierte Messkarte speichert Kraft- und Wegdaten, die anschließend am Computer eingelesen werden. Mit Hilfe einer speziellen Software können Penetrometermessdaten einer Reihe von Einstichen in zweidimensionalen Flächengrafiken dargestellt werden (BUESCHER et al., 2009). MATTHIESEN (2008) verwendete einen „Penetrologger“ für die Untersuchung von gequetschtem Feuchtgetreide im Folienschlauch im Vergleich zu Kernbohrungen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich qualitative Unterschiede bezüglich der Lagerungsdichte innerhalb eines Siliergutes gut nachweisen lassen, wohingegen quantifizierbare Aussagen zur Lagerungsdichte erst nach einer Kalibrierung am Siliergut möglich sind. Neben der Lagerungsdichte hatten getreideartspezifische Eigenschaften großen Einfluss auf den Eindringwiderstand.

## **2.6 Messung des Porenvolumens in Silage**

In der Praxis gilt als Maß für die Verdichtung eines Siliergutes dessen Lagerungsdichte, die mit den in Kap. 2.5 beschriebenen Methoden bestimmt werden kann. Einen genaueren Aufschluss über die Größe der möglichen Sauerstoffdiffusion in den Silagestapel ergibt jedoch die direkte Messung der Porosität im Silo (PITT, 1986). Dies erfordert jedoch die Entnahme unzerstörter Proben von einem definiertem Volumen, an denen das Porenvolumen bestimmt werden kann. REES et al. (1983) haben ein Verfahren entwickelt, bei dem zunächst Bohrkerne unter Erhalt der Struktur gewonnen werden und anschließend das Porenvolumen mit einer Druckdifferenzmethode bestimmt wird. Der Aufbau der für die Druckdifferenzmessung verwendeten Apparatur ist in Abb. 25 schematisch dargestellt. Sie besteht aus zwei Stahlzylindern ( $V_1$  und  $V_2$ ), die durch eine Druckleitung verbunden (C) sind. An diese sind eine Druckanzeige (D) und ein Druckmesser (E) angeschlossen. Das Ventil (F) ermöglicht es, die Zylinder voneinander abzutrennen. Am Zylinder ( $V_2$ ) befindet sich ein Druckablassventil (G). Die Silageprobe (H) wird im Container (J) aufbewahrt, der in den Zylinder ( $V_1$ ) durch die Klappe (K) eingeschoben wird. Die Endkappen des Containers sind perforiert, um das Passieren von Luft zu ermöglichen (REES et al., 1983).

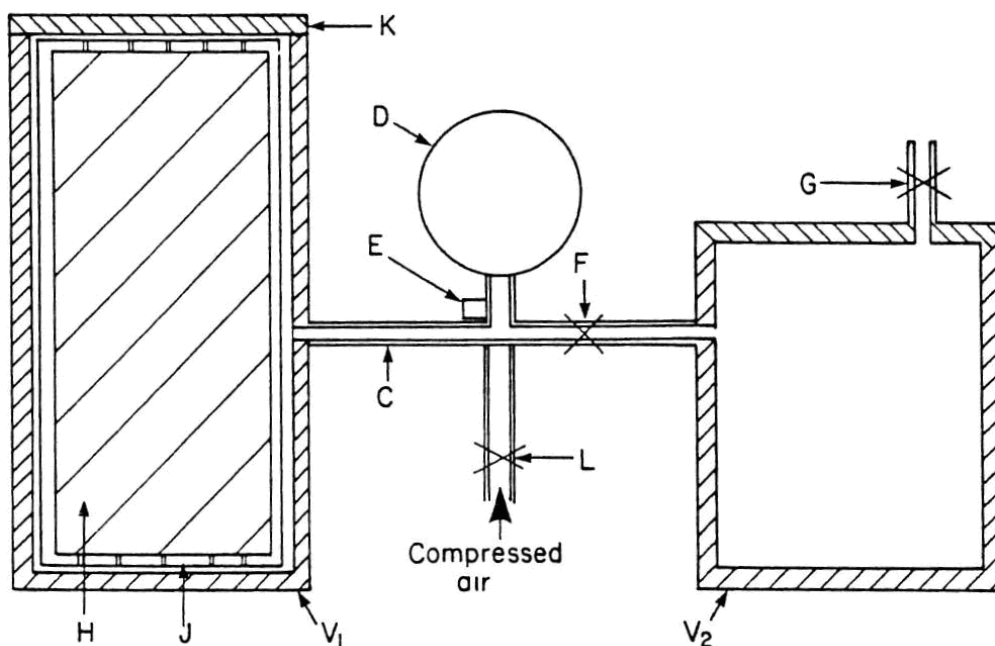


Abbildung 25: Skizze der Messapparatur nach REES et al. (1983)

Der Ablauf der Porenvolumenbestimmung ist in folgenden Schritten durchzuführen:

- a) Ventil F wird geschlossen.
- b) Ventil L wird geöffnet.
- c) Komprimierte Luft wird zugeführt.
- d) Ventil L wird geschlossen, sobald der Druck einen Messwert von  $414 \text{ kN/m}^2$  (P) erreicht hat.
- e) Ventil F wird anschließend geöffnet und der Druck in  $V_1$  und  $V_2$  kann sich stabilisieren.
- f) Der Druck ( $P_1$ ) wird eingetragen.

Das Volumen einer Silageprobe setzt sich aus drei Fraktionen mit jeweils unterschiedlichem Aggregatzustand zusammen. Diese sind Festsubstanz (Silage-Trockensubstanz), Wasser und Porenvolumen. Das Porenvolumen ist nur zu Beginn der Einlagerung mit Luft gefüllt, während diese im Verlauf der Silierung einer Stickstoff-Kohlendioxidatmosphäre weicht.



Die Porosität ist definiert als der Anteil von freien Gasen in der Probe und kann ausgedrückt werden als:

$$\text{Porosität } (\eta) = (\text{Volumen der Probe} - \text{Volumen der Silage}) / \text{Volumen der Probe}$$

REES et al. (1983) nehmen an, dass der Druck in Zylinder  $V_1$ , der die Silageprobe enthält, zu Druck  $P$  über den atmosphärischen Druck hinaus erhöht wird, während der Druck in Zylinder  $V_2$  wie der atmosphärische Druck bleibt. Wenn das Ventil zwischen den beiden Zylindern geöffnet wird, gleicht sich der Druck in beiden Zylindern zum Druck  $P_1$  aus, sodass nach dem Boyleschen Gesetz gilt (bei konstanter Temperatur):

$$\text{Gleichung 7: } P \cdot (V_1 - s) = P_1 \cdot (V_1 - s + V_2)$$

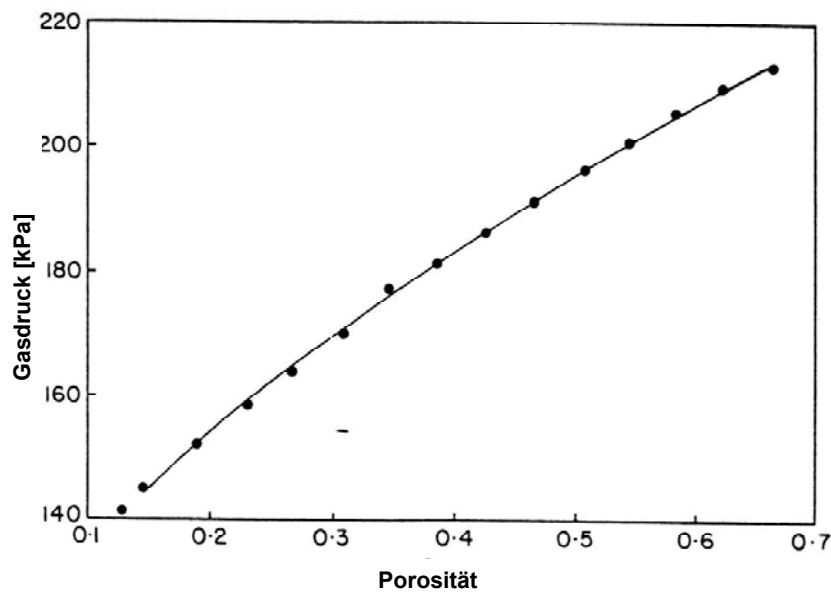
Wird die Formel nach  $s$  aufgelöst, so ergibt sich (REES et al., 1983):

$$\text{Gleichung 8: } s = V_1 - \frac{P_1 \cdot V_1}{P - P_1}$$

Wenn  $G$  das Volumen des Probebehälters einschließlich der „Keine-Luft“ Fraktion  $s$  ist, dann lässt sich die Porosität  $\eta$  wie folgt berechnen (REES et al., 1983):

$$\text{Gleichung 9: } \eta = 1 - \frac{s}{G} = 1 - \frac{V_1 \cdot P - P_1 \cdot (V_1 + V_2)}{G \cdot (P - P_1)}$$

Der Apparat wurde durch den Gebrauch von maschinell hergestellten Stahlscheiben mit bekanntem Volumen kalibriert (Abb. 26).



**Abbildung 26: Kalibrierkurve der Messapparatur nach REES et al. (1983)**

Es ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Porosität und dem Druck  $P_1$  nach Druckausgleich. Der Druck  $P$  in  $V_1$  hat ursprünglich einen Wert von 0,4 MPa. In  $V_2$  herrscht atmosphärischer Luftdruck. Nach dem Öffnen von Ventil F gleichen sich die Druckwerte in  $V_1$  und  $V_2$  aus. Der neue Druckwert wird als  $P_1$  bezeichnet. Das bedeutet: je stärker der Druck von  $P$  auf  $P_1$  abfällt, desto niedriger ist das Porenvolumen in der Probe. Die Genauigkeit der Methode wird von zwei Faktoren wesentlich beeinflusst. Dies ist zum einen die Volumendifferenz zwischen Probe und Druckzylinder  $V_1$  und zum anderen die Druckdifferenz vor dem Druckausgleich. Erstere ist durch genaues Anpassen der Probe auf ein Minimum zu reduzieren, während die maximal mögliche Druckdifferenz durch die Konstruktion des Zylinders begrenzt ist (REES et al., 1983).

Nach DEWAR und MC DONALD (1961) stehen Porosität ( $\eta$ ) und Dichte ( $\rho$ ) theoretisch in folgender Beziehung:

**Gleichung 10:**  $\eta = 1 - \rho_b / \rho_{b0}$

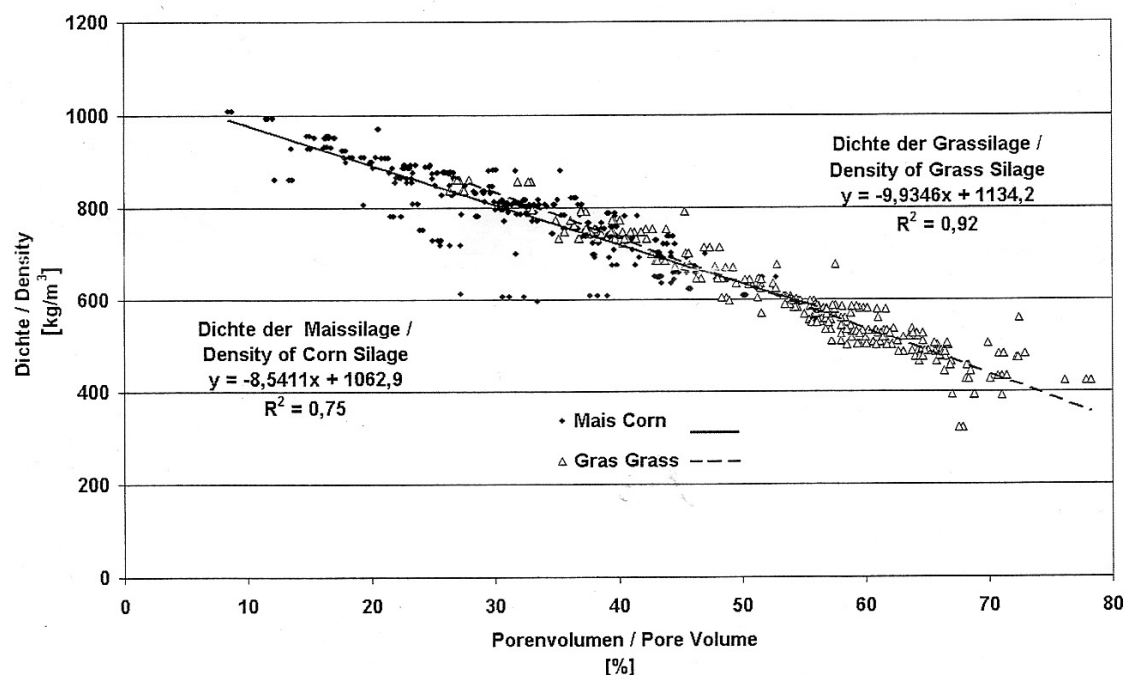
In der Gleichung steht  $\rho_{b0}$  für die Dichte bei einer Porosität von null. WILLIAMS (1994) hat das von REES et al. (1983) entwickelte Verfahren angewendet und die Ergebnisse mit Gleichung 10 verglichen. Er nahm an, dass  $\rho_{b0}$  bei einer bestimmten Trockensubstanz

konstant ist. Dann müsste eine negative, lineare Abhängigkeit zwischen Dichte und Porosität gefunden werden. WILLIAMS (1994) konnte diese Beziehung experimentell beweisen und schlägt folgende Formel zur Verbesserung der Gleichung 10 vor (WILLIAMS, 1994):

**Gleichung 11:**  $\eta = 1 - 0,868 \rho_b / \rho_{b0}$

Er kommt jedoch zu dem Schluss, dass seine Formel nur eine geringfügige Verbesserung für die Vorhersage der Porosität darstellt und dass es noch andere Quellen für die Varianz in dem System geben muss (WILLIAMS, 1994).

HÄBLER et al. (2008) haben Bohrproben waagrecht aus der Anschnittsfläche entnommen und das Porenvolumen mit einem Luftpyknometer gemessen. Das Porenvolumen ist in Abb. 27 gegenüber der Frischsubstanzdichte aufgetragen.



**Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Silagedichte und Porenvolumen (HÄBLER et al., 2008)**

Im linearen Verlauf sehen HÄBLER et al. (2008) einen Erhalt der Struktur der verdichteten Silage. Unterschiedliche Feuchten der Proben haben Abweichungen zur Folge, da sich

die Dichte der inkompressiblen Fraktionen (Wasser plus Festsubstanz) in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiebt (HÄBLER et al., 2008)

## **2.7 Technische Entwicklung der Folienschlauchsilierung**

Die Idee und die Entwicklung der ersten funktionsfähigen Siloschlauchpresse stammen von der Firma Eberhardt unter Leitung von Herrn Dr. Eggenmüller. Im Jahr 1968 wurde die erste Maschine entworfen und bereits im Jahr 1970 die erste Schlauchpresse in Betrieb genommen. Die Grundidee bestand in einer mechanisierten Lösung der in den Jahren zuvor aufgekommenen Silagebereitung, ohne aufwändige bauliche Anlagen errichten zu müssen (EBERHARDT, 1972).

Von der Verdichtung des Siliergutes in einem geschlossenen Folienschlauch versprachen sich die Entwickler einen nahezu vollständigen Luftabschluss, der ohne arbeitsintensive manuelle Abdekarbeiten am Silo zu realisieren ist. Neben der Entwicklung einer geeigneten Presstechnik benötigte man jedoch auch einen den Anforderungen entsprechenden Folienschlauch, in den das Siliergut verpresst werden konnte. Firma Eberhardt wählte auf Empfehlung des KTBL die auf dem Agrarfoliensektor führende Firma Schlayer-Polidress aus, um diese Entwicklung zu beginnen. Erste Versuche wurden mit am Boden verklebten Gewächshausfolien und Holzspänen als Pressgut durchgeführt. Im Jahr 1970 wurden die ersten weißen Folienschläuche hergestellt. Da die Folienschläuche zusammengelegt auf einer Rolle geliefert wurden, mussten diese von Hand abgerollt und auf den Tunnel der Presse aufgeschoben werden. Die Silopresse selbst bestand im Wesentlichen aus einer Siliergutaufnahme mit Zuführeinrichtung, dem Pressrotor mit Untersetzungsgetriebe und dem im Gutfluss anschließenden Presstunnel, auf den der Folienschlauch aufgeschoben wurde. Um der Vortriebskraft durch den Pressvorgang entgegen zu wirken und um einen Pressdruck aufbauen zu können, wurde ein Bremssystem mit einer Gegenhalteeinrichtung hinter dem Schlauchende verbunden. Die Presse konnte so über dosiert zu bremsende Seiltrommeln gegen den Druck des Siliergutes gehalten werden und langsam mit zunehmendem Arbeitsfortschritt vorwärts rollen. Der Antrieb erfolgte über eine Gelenkwelle von einem Standardschlepper, der seitlich vor der Presse positioniert war.

Die anfangs auch von Wissenschaftlern hervorgehobenen Vorteile der neuen Technik, wie schneller Luftabschluss und kleine Anschnittflächen, haben auch heute noch Bestand. In der Praxis traten jedoch erhebliche Probleme auf. Die Durchsatzleistung von 15 bis 20 t/h

war zu gering für stetig steigende Erntemassen-Ströme und die Verwendung von nicht gefalteten Folienschläuchen machte mühsame Handarbeit bei ihrem Aufziehen notwendig. Hinzu kamen Probleme mit der Folienqualität und der Siliergutentnahme. Ende der 70er Jahre wurde die Produktion der Eberhardt-Silopresse in Deutschland eingestellt (STEINHÖFEL und WEBER, 2005).

Bereits Mitte der 70er Jahre wurden Eberhardt-Silopressen in die USA importiert. Die Landwirte Larry Ingman, Richard Lee und David Rasmussen wollten die damals noch unvollkommene Technik weiterentwickeln und gründeten 1978 in Omaha die Firma AG BAG Corporation. Da sie selbst keine Maschinenbauer waren, wurden ihre Ideen von Kelly Ryan 1978 im Bau der ersten amerikanischen Silopresse umgesetzt. Ein weiteres Problem war die Weiterentwicklung der Schläuche, die dem stärkeren Pressdruck der Maschinen standhalten mussten. Außerdem gab es noch keine maschinell gefalteten Schläuche, was sich aber durch die von Walter Jay und David Rasmussen entwickelte Folienschlauchfaltmaschine 1979 änderte. Durch die Verwendung von vorgefalteten Schläuchen wurde das Aufziehen auf den Presstunnel wesentlich erleichtert und gleichzeitig größere Schlauchlängen ermöglicht. Die Entwicklung zu größeren Schlauchdurchmessern und Antriebsleistungen führte zu gesteigerter Durchsatzleistung der Schlauchsilagetechnologie. Seit 1982 wurden auch Schlauchpressen mit eigenem Antrieb gebaut, die vor allem Vorteile bezüglich der Bedienung und des Platzbedarfes beim Pressen aufwiesen. Als sich erste Erfolge beim Einsatz der Schlauchsilierung einstellten, wurden auch von anderen Firmengründern Maschinen nach gleichem Funktionsprinzip gebaut.

Nach Deutschland kam die Siloschlauchtechnik erst im Jahr 1993 zurück. Durch ein zufälliges Treffen von Mark Adams (AG BAG England) und Udo Weber (Budissa AG Kleinbautzen) entstand die Idee, die Schlauchsilierung auch in Sachsen zu testen. Bereits im gleichen Jahr wurden mit einer Mietmaschine 15.000 t Mais und Pressschnitzel in Schläuchen siliert. Im Jahr 1994 wurden die ersten Schlauchpressen verkauft und im Folgejahr schon 100.000 t Pressschnitzel im Folienschlauch siliert. Ab 1997 werden wieder Folienschläuche und ab 1998 auch Schlauchpressen in Deutschland produziert. Die Konstruktionen der Pressen wurden von den in den USA gebauten Maschinen übernommen und weiterentwickelt (STEINHÖFEL und WEBER, 2005).

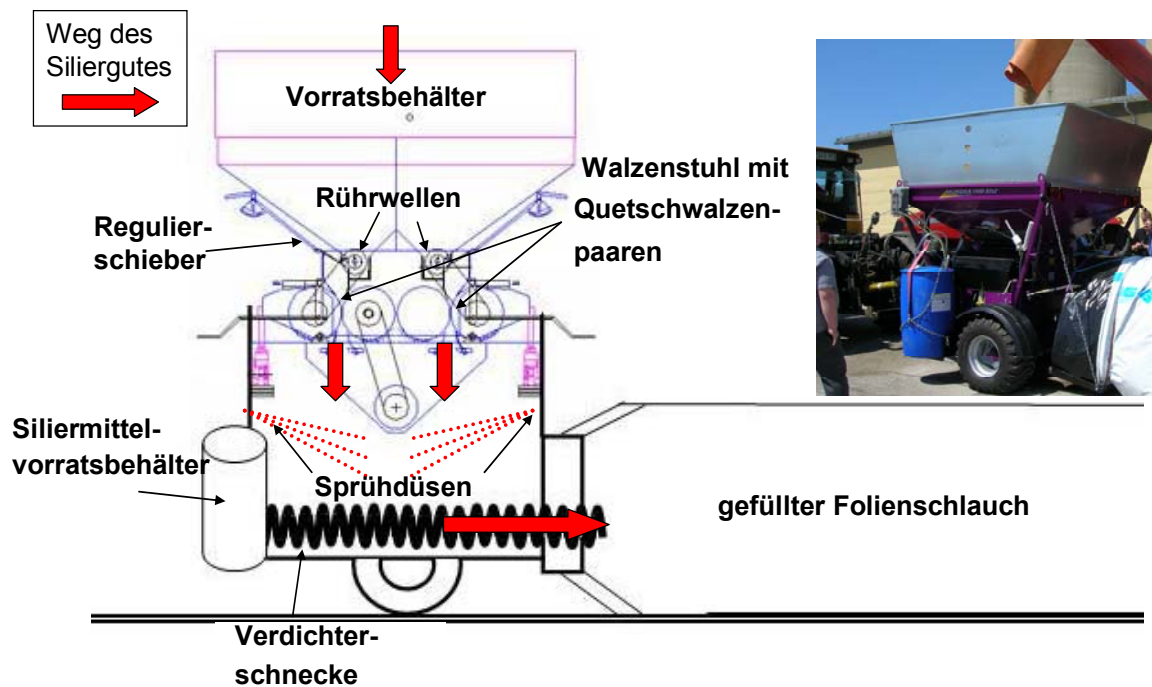
In einem Patent (EGGENMÜLLER, 2002) ist die Konstruktion einer Schlauchpresse in der Form abgeändert, dass ein geschlossener Folienschlauch, bevor dieser beim Pressvorgang gefüllt wird, mittig unter dem Presstunnel längs aufgetrennt wird und die Schnittkanten

durch den in Pressrichtung aufgeweiteten Tunnel seitwärts auseinander geschoben werden. Auf diese Weise befindet sich auf dem mittleren Bereich des Schlauchbodens keine Folie. Um die Folie zu halten und den Luftabschluss zu gewährleisten, liegt das Siliergut in den seitlichen Abschnitten auf der Folie. Es lagert also nicht mehr in einem geschlossenen Schlauch sondern liegt im mittleren Bereich direkt auf dem Untergrund. Die erhofften Vorteile liegen im geringeren spezifischen Folienvverbrauch und in einer einfacheren Siliergutentnahme (EGGENMÜLLER, 2002).

In einem weiteren Patent aus dem Jahr 2004 (EGGENMÜLLER, 2004) wurde die zuvor beschriebene Arbeitsweise dahingehend verändert, dass die Folie nicht als Schlauch sondern in bereits aufgetrennter Form auf einer handelsüblichen Silofolienrolle quer über der Maschine mitgeführt wird. Die Folie wird mit Hilfe von Führungsrollen über und seitlich unter den Presstunnel geführt, sodass das Pressgut im seitlichen Randbereich auf den Folienrändern zum Liegen kommt und so das Silo verschlossen ist. Zu Beginn der Einlagerung kann bei dieser Arbeitsweise jedoch nicht mehr in ein verschlossenes Schlauchende gepresst werden, sondern die Folie ist wie bei der Flachsiloabdeckung am Boden zu beschweren. Aufgrund der fehlenden Gegenhalteeinrichtung ist der Pressdruckaufbau erst möglich, wenn die ausgeworfene Siliergutmasse dem Gegendruck der Presse standhält. Nach Abschluss der Einsilierung kann das Silo nicht durch Verschluss des Schlauchendes abgedichtet werden, sondern ist wie am Siloanfang abzudecken.

Die Umsetzung des oben beschriebenen Arbeitsprinzips wurde von der österreichischen Firma ALKA mit dem Bau von Prototypen begonnen. Die vorgestellten Maschinen arbeiten mit einer 8 m breiten Silofolie und besitzen ausschließlich ein über die Räder der Maschine wirkendes Bremssystem, wodurch die Maschine gegen den Druck des Siliergutes gehalten wird.

Neben der Konservierung von Grundfuttermitteln und industriellen Koppelprodukten, wie Pressschnitzel, wurde die Schlauchsilierung auch in Kombination mit Walzenmühlen für die Konservierung von Feuchtgetreide und Feuchtmais eingesetzt (MATTHIESEN, 2007). Bei diesem Verfahren werden die Körnerfrüchte von einem Crimper-Bagger (Maschineneinheit aus Walzenmühle und Schlauchpresse) geschrotet und anschließend mit einer Extruderschnecke in einen Folienschlauch verpresst.



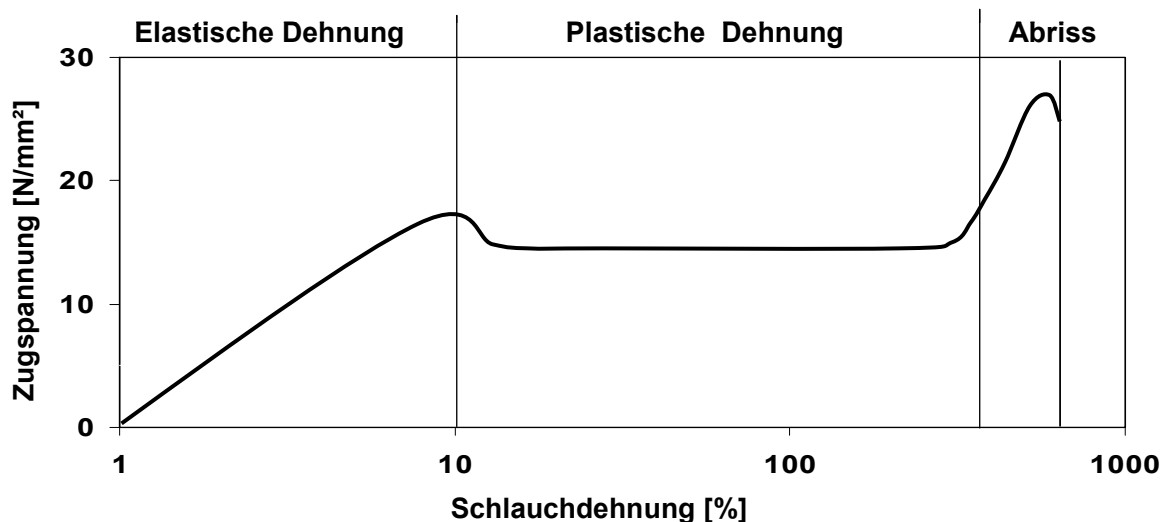
**Abbildung 28: Skizze eines Crimper-Baggers mit Darstellung der wesentlichen Baugruppen (mod. nach WAGNER, 2006)**

Die Siliergutverdichtung mittels Schnecke hat sich für die Verarbeitung von Erntegütern kleiner Partikelstruktur bewährt, ist jedoch für größere Partikellängen, wie sie vor allem bei Anwelksilage vorkommen, nicht geeignet.

Die sichere und dauerhafte Konservierung einer Silage ist, wie in Kap. 2.2 beschrieben, in erheblichem Maße von der Sicherstellung anaerober Silierbedingungen abhängig. Um diese zu erreichen, ist bei der Schlauchsilierung die Folienqualität der Schläuche von entscheidender Bedeutung. Im Vergleich zu Siloabdeckfolien sind Schlauchfolien im Verlauf des Pressprozesses und auch während der Lagerphase erheblich größeren mechanischen Belastungen ausgesetzt, weshalb sie vor allem im Bereich der mechanischen Belastungsparameter bessere Eigenschaften aufweisen müssen.

Zurzeit bestehen jedoch keine vom Anwender nachprüfbaren objektiven Bewertungskriterien, außer der Materialstärke (MATTHIESEN, 2007). Diese sagt jedoch nur wenig über die Werte der technischen Parameter aus, da vor allem die verwendeten Rohstoffe und die Verarbeitung diese beeinflussen. Im Rahmen der Qualitätskontrollen der Hersteller können die Merkmale Reißdehnung, Reißfestigkeit, Weiterreißfestigkeit, Durchstoßfestigkeit und UV-Beständigkeit untersucht werden. Die Reißdehnung gibt die maximale Dehnung in % bis zum Abriss der Folie an, die für Schlauchfolien mehr als 750 % betragen sollte. Die im

praktischen Einsatz angestrebte Dehnung während des Pressvorganges liegt jedoch nur bei 10 bis 15 %, da in diesem Bereich noch eine elastische Dehnung mit im Dehnungsverlauf zunehmender Zugkraft stattfindet, die zu einem gesteigerten Druck auf das Siliergut führt. Bei einer größeren prozentualen Dehnung ist von einer plastischen Verformung auszugehen, während der die Polyethylenfolie bei einer verringerten konstanten Kraft bis auf mehrere 100 % gedehnt werden kann. Bevor es zum Abriss der Folie kommt, steigt die erforderliche Zugkraft stark an. Der plastische Dehnbereich der Folie ist für den Prozess der Schlauchsilierung nur als Sicherheitsreserve bei punktuellen Überdehnungen einzukalkulieren, der ein Aufreißen der Folie verhindert. In Abb. 29 ist der Zusammenhang zwischen prozentualer Längendehnung und der Zugkraft dargestellt.



**Abbildung 29: Zugfestigkeit einer Polyethylenfolie über den Dehnverlauf (schematische Darstellung) (MEISE, 2008)**

Der Test auf Reißfestigkeit kennzeichnet die Zugkraft nach maximaler Foliendehnung beim Abriss bezogen auf die Querschnittsfläche. Die absolute maximale Zugkraft einer Folie ist somit von der Reißfestigkeit und der Folienstärke abhängig.

Die Weiterreißfestigkeit ist bei Folienschläuchen ein besonders wichtiger Qualitätsparameter, da der gesamte Schlauch nach der Einlagerung unter Zugspannung steht und Beschädigungen nicht ausgeschlossen werden können. Der Test wird mit einem eingeschnittenen Foliestück durchgeführt, welches beidseitig eingespannt, durch entgegengesetzte Bewegung gerissen und die dabei auftretende Kraft aufgezeichnet wird.



Ein weiteres Kriterium ist die Durchstoßfestigkeit der Folie, welche mit Hilfe des Darttests ermittelt wird. Hierbei wird eine genormte Prüfkörperform aus definierter Höhe auf die gespannte Folie fallengelassen. Die Masse des Prüfkörpers wird durch Aufstecken von zusätzlichen Gewichtsscheiben bei jedem weiteren Versuch so weit erhöht, bis ein Durchstoß festzustellen ist.

Die UV-Stabilisierung einer Schlauchfolie sollte auf mindestens 24 Monate ausgelegt sein, da der Schlauch durch die abgerundete Form des Silos in Teilbereichen der direkten Einstrahlung ausgesetzt ist, und eine Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften zum Reißen der gespannten Schlauchfolie führen kann. Außerdem ist die UV-Stabilisierung an den vorgesehen Einsatzort anzupassen, da die Globalstrahlung vom Breitenkreis und den vorherrschenden Klimabedingungen abhängig ist. Sie wird unter Verwendung eines speziell entwickelten Strahlungsschranks getestet, in dem eine Lebensdauer von mehreren Jahren unter Außenbedingungen in wenigen Monaten simuliert werden kann (MEISE, 2008). Die Mindestwerte für die technischen Parameter von Silofolien und Schlauchfolien sind in Tab. 4 dargestellt.

**Tabelle 4: Anforderungen an die Folienqualität von Fahrsilofolien und Folienschläuchen (nach MEISE et al., 2006)**

<b>Parameter</b>	<b>DLG-Standard Fahrsilofolie</b>	<b>Mindeststandard Siloschlauch (Durchmesser 2,7 m)</b>
Recyclatanteil im Rohstoff	möglich	nicht möglich
Foliendicke ( $\mu\text{m}$ )	200	215
Abweichung von Nenndicke (%)	$\pm 5$	keine
Abweichung von Einzelwerten (%)	$\pm 15$	$\pm 12$
Reißfestigkeit ( $\text{N/mm}^2$ )	$\geq 17$	$\geq 23$
Reißdehnung (%)	$\geq 400$	$\geq 750$
Weiterreißfestigkeit (g)	-	$\geq 1.800$
Durchstoßfestigkeit (g)	-	$\geq 800$
Gasdurchlässigkeit ( $\text{cm}^3\text{O}_2/\text{m}^2$ )	$\leq 250$	$\leq 200$
UV-Beständigkeit (Monate)	je nach Hersteller	24

Für die Verbesserung des Luftabschlusses auf Fahrsiloplanlagen wurden spezielle „Sauerstoff-Barriere-Folien“ entwickelt, die eine wesentlich geringere Gasdurchlässigkeit aufweisen (RICH et al., 2009). Die Sauerstoffdurchlässigkeit dieser Polyethylen-Polyamid-Folien

beträgt nur 5 bis 10 % gegenüber den üblichen Polyethylen-Folien. Nach Untersuchungen von AMARAL et al. (2009) kann durch den Einsatz einer solchen Folie der Lufteinfluss in der oberen Silageschicht deutlich verringert werden. In Vergleichsversuchen wurde eine um ca. 2 K niedrigere Temperatur in den oberen 25 cm unter der Folie in einem Silierzeitraum von 90 Tagen bei Abdeckung mit dieser PE-PA-Folie festgestellt. Die Werte der mechanischen Belastungsparameter der Folien sind jedoch geringer als bei Polyethylen-Folien, weshalb die Eignung als Schlauchfolie fraglich ist.

### **3 Material und Methoden**

Die in der Arbeit untersuchten Aspekte zur Verdichtung von Siliergütern beim Folienschlauchverfahren wurden in drei Arbeitspaketen behandelt. Zu Beginn wurde eine Messung der Lagerungsdichte an auf Praxisbetrieben eingelagerten Schlauchsilagen durchgeführt, um den Stand der Technik bezüglich der Siliergutverdichtung einschätzen und bewerten zu können. Im zweiten Arbeitspaket war der Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Porosität Gegenstand der Untersuchung, wobei im Rahmen einer Diplomarbeit (ROß, 2008) eine Methode zur Messung der Porosität unter Laborbedingungen weiterentwickelt wurde. Unter Verwendung dieser Methode wurde die Porosität am Beispiel von Silomais in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und TS-Gehalt bestimmt sowie Zusammenhänge abgeleitet. Im dritten Abschnitt steht die Optimierung der Pressdruckregelung an Schlauchpressen im Vordergrund der Untersuchung. Ergebnisse von Dichteuntersuchungen und Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Steuerung des Pressdruckes durch den Maschinenbediener das Arbeitsergebnis erheblich beeinflusst. Bei Fehleinstellungen können Qualitätsprobleme der Silage oder sogar platzende Schläuche die Folge sein.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Versuchspresse gebaut, unter deren Einsatz Methoden zu Verbesserung der Pressdruckregelung entwickelt und getestet werden konnten.

#### **3.1 Dichtebestimmung an Schlauchsilagen**

Zur Feststellung und Bewertung der beim Folienschlauchverfahren unter Praxisbedingungen erzielten Lagerungsdichten galt es, zunächst eine Methode zu entwickeln, mit der die Lagerungsdichte an Schlauchsilos gemessen werden kann. Die zum Einsatz kommende Technik sollte für die Beprobung verschiedener Siliergüter geeignet sein, eine hohe Messgenauigkeit besitzen und zudem die Abbildung der Lagerungsdichte über den Schlauchquerschnitt ermöglichen. Letzteres ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da in früheren Untersuchungen sehr große Differenzen vom Kernbereich der Silos zu den oberen und seitlichen Schlauchbereichen festgestellt wurden (Kap. 2.2.3). Weiterhin sollte die Beprobungstechnik mobil und auf jedem Untergrund einsetzbar sein.

Die für ihre gute Messgenauigkeit bekannten radiometrischen Messverfahren kamen für die Untersuchung aufgrund der notwendigen Sicherheitsanforderungen sowie des erforderlichen speziell geschulten Bedienpersonals nicht in Frage. Rammkernsonden, die von oben

in das Siliergut getrieben werden (z.B. die Methode SILOBOY) schienen ebenfalls nicht geeignet, da eine differenzierte Beprobung über die Querschnittsfläche kaum möglich und außerdem die Handhabung auf der gerundeten Schlauchoberfläche schwierig ist. Die Wahl der Beprobungsmethode wurde deshalb auf senkrecht zur Anschnittfläche einsetzbare Probennehmer eingegrenzt. Im Rahmen von vorangegangenen Projekten am Institut (LEURS, 2006 und MATTHIESEN, 2007) wurde der PIONEER Probenbohrer eingesetzt, unter dessen Verwendung auch die Probenahme in anderen Untersuchungen zur Fahrsiloverdichtung (SPIEKERS et al., 2004 und THAYSEN, 2006) durchgeführt wurde. Bei den Probenahmen an Feuchtmais und Feuchtgetreide im Folienschlauch (MATTHIESEN, 2006) wurde jedoch ein Zusetzen des Bohrstockes festgestellt. Außerdem ist bei weniger hohen Lagerungsdichten ( $< 220 \text{ kg TS m}^{-3}$ ) eine Korrektur der Werte aufgrund der Gutverdrängung erforderlich (Abb. 18). Vergleichsmessungen an Maissilage mit einem am Institut konstruierten Bohrstock, dem PIONEER Probenbohrer, und der Dichtermittlung mittels Siloblock als Referenzmethode, führten zu dem Ergebnis, dass ersterer Messergebnisse mit geringerer Abweichung liefert.

Die Unterschiede der Eigenentwicklung zum PIONEER Probenbohrer bestehen in einem größeren Durchmesser und einer nach innen stärker abgesetzten Schneidkrone, was beides zu einer relativ verringerten Reibung des aufgenommen Gutes an der Zylinderinnenwandung führt. Aufgrund dessen kommt es beim Eindrehen des Bohrstockes nicht zum Zusetzen der Querschnittsfläche und die Verdrängung des Gutes nach außen kann weitestgehend vermieden werden. Der große Innendurchmesser (102 mm) bedingt jedoch auch ein höheres Antriebsmoment, das von Hand nur schwer aufzubringen ist. Der Bohrstock wurde deshalb mit einem Drehstrom-Getriebemotor und Haltegriffen für zwei Personen ausgerüstet. Für die Stromversorgung im Außeneinsatz wird ein Generator eingesetzt.

Die Messung der Lagerungsdichte wurde auf Praxisbetrieben an den in Tab. 5 aufgeführten Silagen im April 2007 und 2008 nach folgender Vorgehensweise durchgeführt.

**Tabelle 5: Anzahl der beprobten Schlauchsilagen der jeweiligen Siliergüter**

<b>Siliergut</b>	Silomais	Pressschnitzel	Lieschkolben- schrot	Gras	Luzerne	Ganzpflanzsilage
Anzahl (Silos)	10	10	7	6	4	2

Für die Entnahme der Proben wurde der oben beschriebene, elektrisch angetriebene Bohrstock eingesetzt. Das sich innerhalb der Schneidkrone (Innendurchmesser 102 mm) befindliche Siliergut wird während des Eindrehens aufgenommen. Nach Erreichen der angestrebten Beprobungstiefe von 50 cm wird der gefüllte Bohrstock durch Umschalten auf Linksdrehung aus dem Silo entnommen. Zum Entleeren ist die Steckverbindung zum Antrieb zu lösen und der Bohrstock auf eine für diesen Zweck angefertigte Halterung aufzusetzen. Der Probeinhalt kann nun mit einem Stempel in die darunter stehende Box ausgeschoben werden.



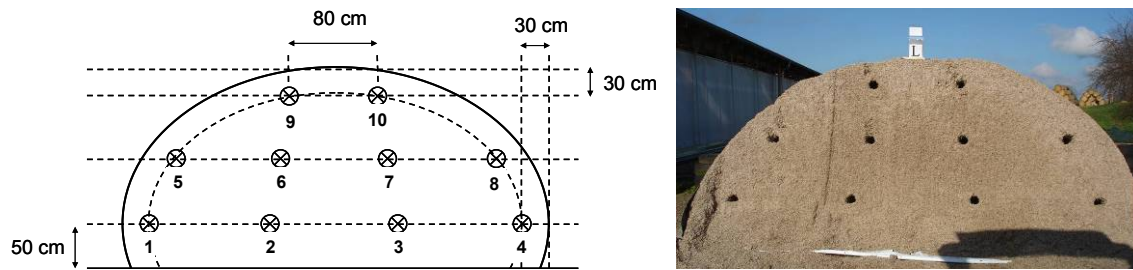
**Abbildung 30: Probenehmer am Silo (links), gefüllter Bohrstock (Mitte) und Bohrstelle nach Probenahme (rechts)**

Die Bestimmung der Frischsubstanzdichte  $\rho_F$  erfolgt über Verwiegung der Bohrprobe vor Ort, während für die Berechnung der Trockensubstanzdichte  $\rho_T$  zusätzlich der TS-Gehalt der Probe zu ermitteln ist. Hierfür werden jeweils ca. 200 g der Probe in Gefrierbeutel verpackt und gekühlt transportiert. Die Proben werden im Trockenschrank bei 105°C 24 h lang getrocknet und durch Bestimmung der Massendifferenz der TS-Gehalt ermittelt. Die Werte für  $\rho_F$  und  $\rho_T$  berechnen sich nach folgenden Gleichungen.

**Gleichung 12:** 
$$\rho_{FS} = \frac{m_p}{V_p}$$

**Gleichung 13:** 
$$\rho_{TS} = \frac{m_p}{V_p} \cdot TS - \text{Gehalt}$$

Die Beprobung der Schlauchsilagen wurde an 10 Positionen verteilt über die Anschnittfläche nach dem in Abb. 31 dargestellten Muster mit horizontalen Bohrungen durchgeführt.



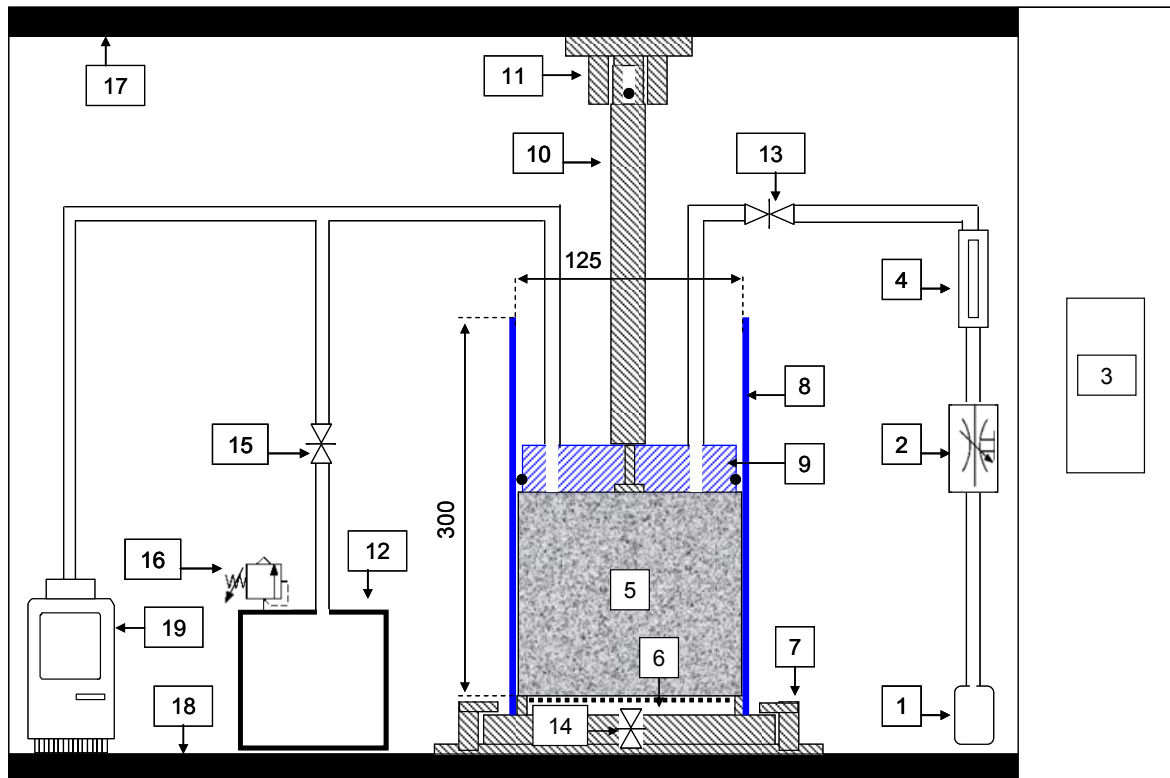
**Abbildung 31: Verteilung der Beprobungspositionen am Schlauchanschnitt**

Die Abstände zwischen den Ebenen und den auf einer Ebene liegenden Beprobungspositionen (1-2-3-4 und 5-6-7-8) sind jeweils gleich groß und werden an Höhe und Breite der jeweiligen Schlauchsilos angepasst.

### 3.2 Messung der Porosität

Für die Messung der Porosität von Siliergütern unter Laborbedingungen wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (ROß, 2008) eine Methode entwickelt, bei deren Anwendung in einem Arbeitsgang eine Probe auf eine definierte Lagerungsdichte eingestellt und anschließend das enthaltene Porenvolumen bestimmt wird. Diese ist somit als Weiterentwicklung der unter Kap. 2.6 beschriebenen Methode von REES et al. (1983) anzusehen, unter deren Anwendung die Bestimmung der Porosität von in ihrer Struktur erhaltenen Bohrkernen erfolgte. Im Folgenden wird der Aufbau der Messapparatur in seiner letzten Entwicklungsstufe beschrieben und die Funktionsweise erläutert.

Die Verdichtung einer Siliergutprobe auf Zielwerte der im Bereich von Siloanlagen erzielten Lagerungsdichten erforderte zunächst eine mit ausreichendem Druck und Präzision arbeitende Mechanik. Um die Expansion und damit den Rückgang der Lagerungsdichte zu vermeiden, sollte die Messung der Porosität bei fest eingestellter Dichte im komprimierten Gut erfolgen. Als Probebehälter wurde ein Zylinder aus Plexiglas eingesetzt, der auf einen Aluminiumsockel aufgesetzt ist. Der Sockel besitzt eine perforierte Oberseite mit einem darunter liegenden Hohlraum zum Auffangen von Sickersaft. Zum Verdichten des Siliergutes wird ein passgenauer Kunststoffkolben, der über eine Kolbenstange mit der traverse einer Materialprüfmaschine verbunden ist, in den befüllten Zylinder eingefahren.



- |   |  |
|---|--|
| 1) Druckluftbehälter (0,8 MPa)                  | 11) Aufnahme Kolbenstange                          |
| 2) Druckregelventil                             | 12) Druckausgleichsbehälter (300 cm <sup>3</sup> ) |
| 3) Bedienterminal Materialprüfmaschine          | 13) Sperrventil (Zuluft)                           |
| 4) Durchflussmesser                             | 14) Sperrventil (Abluft)                           |
| 5) Füllraum                                     | 15) Sperrventil (Druckausgleich)                   |
| 6) Sickersaft-Auffangraum (70 cm <sup>3</sup> ) | 16) Überdruckventil                                |
| 7) Zylinderhalterung                            | 17) Obere feste Traverse                           |
| 8) Plexiglaszylinder                            | 18) Untere fahrbare Traverse                       |
| 9) Presskolben mit Dichtungsring                | 19) Datenlogger                                    |
| 10) Kolbenstange                                |  |

**Abbildung 32: Skizze des Versuchsaufbau zur Bestimmung des Porenvolumens**

Die Abdichtung zur Zylinderwand erfolgt durch einen O-Ring. Zum Zentrieren und Fixieren des Zylinders ist auf der unteren Traverse der Materialprüfmaschine eine Halterung für den Probezylinder angebracht.

Für die Druckluftzuführung und die Verbindung zum Druckausgleichsbehälter mit geschlossenem Drucksensor sind Bohrungen und Ansatzstücke in den Kolbenboden eingelassen. Zwischen Druckluftquelle und Probezylinder sowie zwischen Probezylinder und Druckausgleichsbehälter befinden sich Sperrhähne. Am Sockel des Probezylinders ist ein Ablasshahn montiert. Der Einfahrweg des Kolbens kann über die Höhenmessung der Materialprüfmaschine mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gewählt und justiert werden.

### **3.2.1 Überprüfung der Messapparatur**

Um mit dem in Abb. 32 dargestellten Versuchsaufbau abgesicherte Ergebnisse für die Porosität von komprimierten Siliergütern zu erhalten, war es notwendig, die Apparatur zu kalibrieren. Dies kann unter Verwendung von Probematerial mit bekanntem Porenanteil, z.B. Glaskugeln oder Stahlscheiben (REES et al., 1983), durchgeführt werden. Beim oben beschriebenen Versuchsaufbau kann das Probematerial jedoch auch durch Einfahren des Kolbens auf bestimmte Höhen im leeren Probezylinder simuliert werden. Letztere Variante wurde vor den Messungen mit Siliergut durchgeführt. Der mit zunehmender Einfahrtiefe verkleinerte Raum unter dem Kolben stellt das Porenvolumen dar, während der im Vergleich zur Ausgangsposition durch den Kolben verdrängte Raum als Anteil von Festsubstanz plus Wasser angesehen wird.

Die Durchführung ist in folgenden Schritten beschrieben:

Schritt 1:

Der Zylinder wird in die Halterung unter den Kolben gestellt und der Kolben von Hand eingepasst. Anschließend wird dieser auf eine definierte Höhe in den Zylinder eingefahren.

Schritt 2a:

Es gibt folgende Ausgangslage: Ventil (13) ist geschlossen. Ventil (14) und (15) sind geöffnet. Dies ist wichtig, damit im Druckausgleichsbehälter (12) atmosphärischer Luftdruck herrscht. Anschließend wird Ventil (15) geschlossen, damit in Druckausgleichsbehälter (12) der atmosphärische Luftdruck bestehen bleibt.

Schritt 2b:

Ventil (14) wird geschlossen und Ventil (13) wird geöffnet, so dass der Druck im Füllraum (3) und im Hohlraum (7) ansteigt.



## Schritt 2c:

Ist ein Druck von über 30 KPa erreicht, wird Ventil (13) geschlossen. Bei Siliergut als Probematerial sollte bis zum Notieren des Druckwertes wenigstens eine Minute gewartet werden, da die sich im Gut ausbreitende Luft eine gewisse Zeit benötigt, um alle Poren gleichmäßig zu füllen.

## Schritt 3a:

Nach Notieren des Druckwertes P ist Ventil (14) zu öffnen, damit Luft in den Ausgleichsbehälter (12) entweichen kann und sich der Druck in den beiden Behältern ausgleicht. Es sollte nochmals einen Moment gewartet werden, bevor der neue Druckwert  $P_1$  notiert wird. Der Druckwert  $P_1$  ist nach ca. 30 Sekunden annähernd konstant.

## Schritt 3b:

Alle nötigen Druckwerte sind an dieser Stelle bereits festgehalten worden. Abschließend wird die Messapparatur in die Ausgangslage versetzt: Ventil (13) ist geschlossen, Ventil (15) und (13) sind geöffnet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bei der nächsten Messwiederholung im Ausgleichsbehälter (12) atmosphärischer Luftdruck herrscht.

## Schritt 4:

Die notierten Messwerte P und  $P_1$  werden in die Formel zur Berechnung der Porosität eingetragen.

Nach der allgemeinen Gasgleichung gilt, dass das Produkt aus Druck und Volumen für Gase gleicher Temperatur konstant ist. Die Temperaturdifferenz bei diesem Versuch ist so gering, dass sie hier nicht berücksichtigt werden muss.

Es gilt deshalb:

**Gleichung 14:** 
$$P \cdot V_P = P_1 \cdot (V_P + V_2)$$

$$V_P = \frac{P_1 \cdot V_2}{P - P_1}$$

**Gleichung 15:** 
$$\text{Porosität } (\eta) = \frac{V_1 - V_{TS+W}}{V_1}$$

$$\eta = \frac{V_P}{V_1}$$

Zur Validierung der Ergebnisse wurden Messungen mit stufenweise verringertem Porenvolumen durchgeführt. Da das tatsächliche Volumen unter dem Kolben durch Vermessung jeweils bekannt war, konnte ein direkter Abgleich der Ergebnisse durchgeführt werden.

Die durchschnittliche Abweichung der über die Druckdifferenz berechneten Werte von den geometrisch gemessenen betrug 1,8 %, während die maximale Abweichung bei 3,7 % lag. Die Messgenauigkeit für die weiteren Versuche wurde als hinreichend genau angesehen, könnte jedoch noch verbessert werden.

### 3.2.2 Messung des Porenvolumens in Siliergut

Für die Messung des Porenvolumens im Siliergut wurde ein konstantes Probenvolumen von  $1.770 \text{ cm}^3$  festgelegt. Das zur Verfügung stehende Füllvolumen des ganzen Zylinders und die dabei einzustellende Einfahrtiefe des Kolbens ermöglichte die Verdichtung des Siliergutes auf bis zu  $290 \text{ kg TS m}^{-3}$  in einem Arbeitsgang. Die Variation der Lagerungsdichte wurde durch Einfüllen der entsprechenden Siliergutmasse realisiert.

Für die Bestimmung des Porenvolumens wurde der Zylinder mit Siliergut befüllt, welches in Form von eingefrorenen Proben vorlag. Anschließend wurde der Kolben auf die eingestellte Höhe eingefahren, wobei das Siliergut verdichtet wurde. Die Messung des Porenvolumens ist wie in Kap. 3.1.2 beschrieben durchgeführt worden, wobei jede Füllung in dreifacher Wiederholung gemessen wurde. Die Füllung und Verdichtung auf die gleiche Lagerungsdichte wurde 4-fach wiederholt.

Für die Durchführung der Untersuchungen an Mais-Siliergut standen Proben mit verschiedenem TS-Gehalt (4 Abstufungen) und zwei theoretischen Häcksellängen zur Verfügung (Tab. 6).

**Tabelle 6: TS-Gehalt und theoretische Häcksellänge der Silomaisproben**

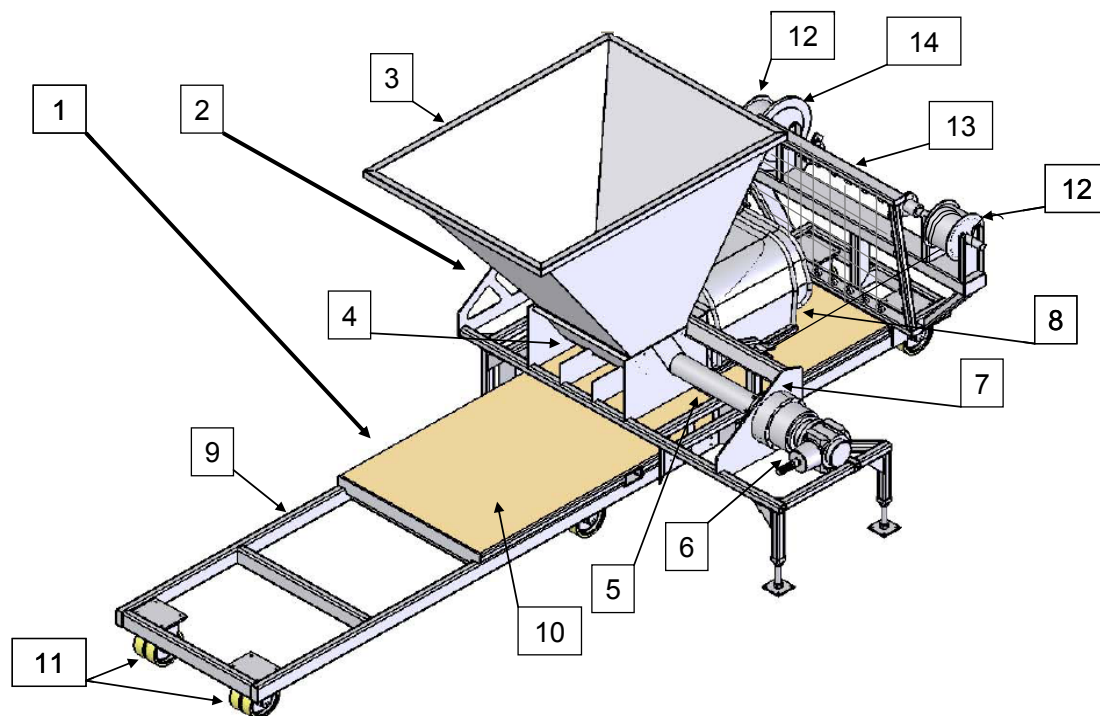
Theoretische Häcksellänge	TS-Gehalt (%)			
6 mm	33,2	36,7	37,4	38,6
12 mm	29,3	32,9	35,0	38,0

### 3.3 Konstruktion und Funktionsweise der Versuchsschlauchpresse

Zur Durchführung von Pressversuchen und für die Entwicklung einer Pressdruckregelung wurde eine Versuchsschlauchpresse konstruiert. Die Konstruktion der Presse sollte gewährleisten, dass die während der Pressung auftretende Haltekraft gegenüber dem gefüllten Schlauch mit minimalen Fremdeinflüssen gemessen und geregelt werden kann. Außerdem war die Möglichkeit der Erfassung der Schlauchkontur während der Pressung zur Onlinebestimmung der Schlauchdehnung vorgesehen.

Die Arbeitsweise der Siliergutverdichtung mit einem Rotor als Verdichtungswerkzeug und anschließendem Stahlblechtunnel wurde von den in der Praxis eingesetzten Schlauchpressen übernommen. Rotorwanne, Seitenbegrenzungsbleche, Kammleiste sowie die Aufnahmen der Rotorlagerung und des Getriebes sind in einem Rahmen verschweißt. Das Getriebe ist an einem Halteblech angeflanscht und der Presstunnel mit der Rotoreinheit verschraubt. Die Pressgutzufuhr erfolgt über einen aufgeschraubten Trichter, der mit Ladefahrzeugen oder anderen Zuführtechniken befüllt werden kann.

Die Schlauchablage erfolgt nicht auf dem Boden sondern auf einem Fahrwagen, der sich während der Pressung unter der ortsfest aufgestellten Presseinheit hindurch bewegt. Diese Konstruktionsweise ermöglicht es, die während der Pressung auftretenden Schub- und Zugkräfte besser zu erfassen, da der Rollwiderstand des Fahrwagens auf ebenem Untergrund sehr gering ist und im Rahmen der geplanten Messungen vernachlässigt werden kann. Der Fahrwagen besteht aus einem rollengelagerten Leiterraum mit einer an der Querseite aufgebauten Halterung für die Aufnahme der Gegenhalteeinrichtung. Diese ist zum einen im gespannten Netzgitter zur Schlauchanlage und zum anderen in einer kugengelagerten Achse mit beidseitig montierten Seiltrommeln ausgeführt. Über die auf der Trommel aufgerollten Drahtseile ist der Fahrwagen mit der Presseinheit verbunden. Auf dem Leiterraum des Fahrwagens ist eine speziell darauf angepasste Stahlpalette mit einer Oberfläche aus Siebdruckplatte angebracht. Die Achse, auf der die Seiltrommeln montiert sind, wird über eine hydraulische Scheibenbremse angebremst, sodass der Widerstand des Fahrwagens gegenüber der von der Presseinheit erzeugten Druckkraft über den Hydraulikdruck einzustellen ist. Da die Drahtseile auf den Trommeln nur einlagig aufgerollt werden, können Längendifferenzen zwischen den Seiten und Abweichungen der Haltekraft in Folge von Änderungen des Abrollradius vermieden werden. Der Durchmesser des Presstunnels wurde so gewählt, dass der dazu passende, gefüllte Folienschlauch ( $\varnothing$  91 cm) bei einer Länge von 4 m noch mit dem Gabelstapler des Versuchsbetriebes zu bewegen ist.



- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1) Fahrwagen             | 8) Presstunnel                |
| 2) Presseinheit          | 9) Leiterrahmen (Fahrwagen)   |
| 3) Aufnahmetrichter      | 10) Stahlpalette              |
| 4) Rotorwanne            | 11) Doppelbockrollen          |
| 5) Pressrotor            | 12) Seiltrommel mit Drahtseil |
| 6) Getriebeeinheit       | 13) Schlauchanlage            |
| 7) Rahmen (Presseinheit) | 14) Scheibenbremse            |

**Abbildung 33: Aufbau und Funktionselemente der Versuchsschlauchpresse**

Der Durchmesser des Pressrotors wurde im Vergleich zur Standardmaschine G 7000 im Maßstab 1:1,5 verkleinert. Eine Anpassung des Rotordurchmessers im Maßstab des Presstunnels schien aufgrund der Stabilität der Rotorwelle und der Struktur des zu verarbeitenden Siliergutes nicht möglich. Der Antrieb des Rotors erfolgt von einem seitlich vor der Presse stehenden Schlepper über eine Gelenkwelle und einer von der Standardmaschine G 6700 übernommenen Getriebeeinheit aus Winkel- und Planetengetriebe. Der zuvor geplante elektrische Antrieb konnte nicht umgesetzt werden, da die für die berechnete

erforderliche Antriebsleistung von 42 kW notwendigen Motor und Getriebekomponenten nicht ohne weiteres verfügbar waren. Die Eckdaten der Versuchsschlauchpresse sind in Tab. A. 2 im Anhang zusammengefasst.

### **3.4 Durchführung der Pressversuche und Untersuchungen am Siloschlauch**

#### **3.4.1 Siliergutverdichtung mit der Versuchsschlauchpresse**

Die ersten Pressversuche mit der unter Kap. 3.3 beschriebenen Versuchsschlauchpresse wurden während der Maisernte 2007 mit frisch gehäckseltem Erntegut auf der Lehr- und Forschungsstation Frankenforst durchgeführt. Dabei galt es, zunächst die Versuchspresse ohne die unter Kap. 3.4.2 beschriebene Sensortechnik auf einwandfreie Funktion zu überprüfen und auftretende Mängel anschließend abzustellen. Es wurden insgesamt sechs Schläuche mit einer Länge von jeweils 4 m und ca. 1,2 t Siliergutmasse gepresst. Während der Versuche wurden folgende Probleme festgestellt:

- Der auf den Presstunnel aufgeschobene Schlauch wurde im unteren Bereich schneller vom Tunnel gezogen als im oberen, sodass sich Falten bildeten.
- Der Presstunnel neigte bei Erhöhung des Bremsdruckes zum Zusetzen, weshalb der Gutstrom am Rotor stockte und das Siliergut zu vermusen begann.
- Die Bremskraft an den Seiltrommeln war nicht ausreichend dosierbar.
- Im Zuführtrichter kam es bei höherem Füllgrad zur Brückenbildung und Unterbrechung des Gutstroms.

Die oben aufgeführten Mängel an der Versuchsschlauchpresse wurden durch verschiedene Umbauten weitgehend behoben.

Der Presstunnelboden wurde gekürzt und zum Tunnelausgang nach unten abfallend gestaltet, um die Durchgangsfläche zum Ausgang zu vergrößern. Zur Verbesserung der Schlauchhaltung an der Tunnelunterseite wurde ein zusätzlicher Wulst angebracht. Die Scheibenbremse wurde durch eine wesentlich kleinere ersetzt, sodass die Bremse in einem höheren Druckbereich geregelt und zudem die Dosierbarkeit verbessert werden konnte. Für die weiteren Versuche kam eine Befüllung des Zuführtrichters mittels Förderband zum Einsatz, wodurch die Brückenbildung des Siliergutes im Trichter zu verhindern war. Des Weiteren wurde die unter Kap. 3.4.2 beschriebene Sensortechnik integriert. Der Pressdruck

wurde jedoch zunächst weiter manuell eingestellt. Der modifizierte Versuchsaufbau mit Befüllung über Futtermischwagen und Förderband ist in Abb. 34 dargestellt.



**Abbildung 34: Versuchsschlauchpresse mit Antriebsschlepper und Pressgutzuführung**

Ziel der weiteren Untersuchungen war die Bestimmung von Messparametern, die als Regelgröße für den Bremsdruck geeignet sind. Die weiteren Pressversuche wurden zunächst aufgrund der ständigen Verfügbarkeit sowie der möglichen Mehrfachbenutzung mit angefeuchteten Hobelspänen durchgeführt. Die Hobelspäne wiesen in ersten Versuchen ähnliche Presseigenschaften wie Mais-Häckselgut auf und behielten diese auch nach mehreren Durchgängen.

Um die Auswirkung der Bremskraft auf den Pressprozess und die Schlauchdehnung zu untersuchen, wurde der Bremsdruck während des Pressvorganges variiert. Eine Pressdruckerhöhung zeigte einen deutlichen Einfluss auf die Schlauchdehnung am zugeordneten Schlauchabschnitt (Abb. 35).



**Abbildung 35: Versuchsschlauch bei kurzzeitiger Bremsdruckerhöhung**

Im Umkehrschluss ließ sich daraus ableiten, dass die Bestimmung des Schlauchumfangs während der Pressung, und damit indirekt der Schlauchdehnung, eine mögliche Regelgröße für den Bremsdruck darstellt. In weiteren Versuchen wurde der für die Pressung relevante Bremsdruckbereich ermittelt, um daraufhin eine geeignete Bremsdruckregelung konstruieren und auslegen zu können.

### 3.4.2 Mess- und Regeltechnik

Um eine funktionsfähige automatische Pressdruckregelung für das Schlauchpressprinzip realisieren zu können, galt es zunächst, praktisch messbare Parameter als Regelgröße zu identifizieren. Die bisher anhand von aufgedruckten Messstreifen manuell bestimmte Schlauchdehnung ist ein für den Pressprozess direkt begrenzender Parameter, der von verschiedenen Größen beeinflusst wird. Neben der über die Drahtseile übertragenen Haltekraft  $F_S$  wird diese erheblich von den technischen Eigenschaften des Folienschlauches sowie den Silierguteigenschaften beeinflusst. Der Gesamtwiderstand  $F_T$  der Presseinheit gegenüber dem gefüllten Schlauch ist jedoch zusätzlich zur Haltekraft  $F_S$  noch vom Rollwiderstand  $F_R$  und der Hangabtriebskraft  $F_H$  der Einheit von Presse und Antriebsschlepper abhängig.  $F_H$  ist nur bei in Längsrichtung geneigten Schlauchablageorten relevant.

**Gleichung 16:**  $F_T = F_S + F_R + F_H$

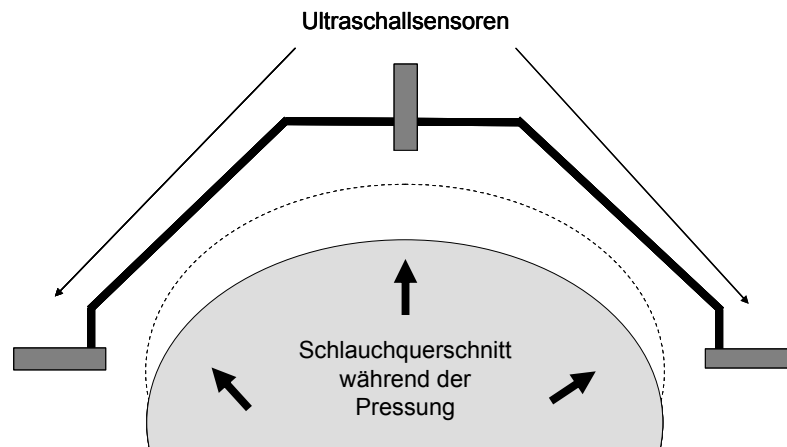
$$F_T = F_S + m_E \cdot g \cdot (\cos \alpha \cdot C_R + \sin \alpha)$$

Bei der unter Kap. 3.3 beschriebenen Versuchspresse ist  $F_R$  jedoch sehr gering, da der Fahrwagen auf Rollen gelagert ist, die auf Beton einen niedrigen Rollwiderstandskoeffizienten  $C_R$  aufweisen. In der Praxis kann der Rollreibungskoeffizient  $C_R$  jedoch abhängig von der Untergrundbeschaffenheit erheblich variieren und so vor allem auf weichem Untergrund den Rollwiderstand  $F_R$  erhöhen. Es war zu erwarten, dass die alleinige Kontrolle von  $F_S$  für die Regelung der Bremskraft wahrscheinlich nicht ausreichend ist, da  $F_R$  und  $F_H$  dabei nicht erfasst werden können.

Welche Parameter zur Pressdruckregelung an einer Schlauchpresse geeignet sind, war zu Beginn der Versuche noch nicht genau absehbar. Ein Verfahren zur Messung der

Schlauchdehnung schien jedoch vielversprechend, da die bisherige, manuelle Regelung auf dieser Messgröße basiert.

Zur Bestimmung von Haltekraft und Schlauchdehnung wurden folgende Sensoren verwendet. Die Zugkraft an den Ansatzpunkten der Drahtseile an der Presseinheit wurde mit DMS-Kraftsensoren gemessen. Die Schlauchdehnung ist über Sensoren kaum direkt messbar, weshalb diese indirekt über die Schlauchkontur gemessen werden sollte. Dazu wurden drei Ultraschall-Abstandsensoren an einem Rahmen beidseitig neben und über dem Schlauch positioniert. Über die Messung von Höhe und Breite des Schlauches während der Pressung kann der aktuelle Schlauchumfang und damit die Schlauchdehnung näherungsweise bestimmt werden.



**Abbildung 36: Position der Abstandsmesssensoren am Schlauchumfang**

Die Berechnung des Schlauchumfangs und damit der Schlauchdehnung  $S_D$  erfolgt über die Gleichung für den Ellipsenumfang mit einem zusätzlichen Korrekturfaktor  $k_U$ , der aus Werten von manuell durchgeführten Umfangsmessungen ermittelt wurde.

**Gleichung 17:**  $U_s = k_U \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)$

Die an der Scheibenbremse bisher eingesetzte Druckmessuhr, wurde durch einen elektronischen Drucksensor ersetzt. Um die Messdaten der Kraft- und Abstandssensoren sowie des Drucksensors über die Schlauchlänge auftragen zu können, wurde die während einer Pressung zurückgelegte Strecke des Fahrwagens mit einem Peiselrad gemessen.

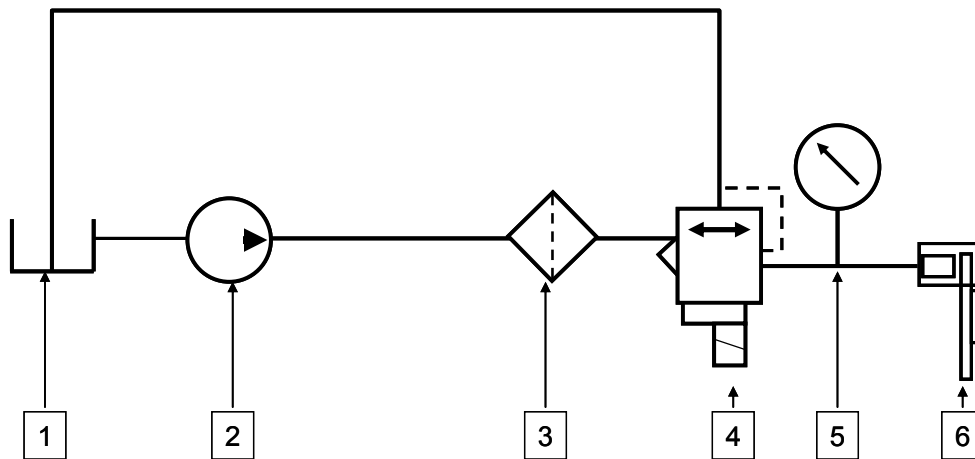


Alle Sensormesswerte wurden in einem dafür geschriebenen Messprogramm über die Zeit aufgezeichnet. Die Kennwerte der verwendeten Sensoren sind in Tab. A. 3 und die Sensorpositionen in Abb. A. 1 im Anhang abgebildet.

### **3.4.3 Regelung des Bremsdruckes**

Die Versuchsmaschine war zu Beginn mit einer manuell zu bedienenden Hydraulikpumpe mit Ablasshahn ausgerüstet, über die der Bremsdruck an der Scheibenbremse eingestellt werden konnte. Für die Durchführung der ersten Pressversuche wurde diese auch eingesetzt. Dabei galt es zunächst zu untersuchen, welcher Regelbereich für die Pressung mit der Versuchsmaschine zu wählen ist und wie sich eine Druckänderung auf die anderen Messgrößen auswirkt.

Um den Bremsdruck in einem Regelkreis automatisch anpassen zu können, musste die manuelle Bremsdruckerzeugung durch ein elektronisch regelbares System ersetzt werden. Ziel war dabei eine stufenlose Anpassung des Bremsdruckes in einem Druckbereich von 0 bis ca. 10 MPa und die Möglichkeit, Steuerbefehle vom Rechner ohne manuellen Eingriff umsetzen zu können. Zur technischen Umsetzung standen verschiedene Möglichkeiten zur Diskussion. Ein möglicher Ansatz ist ähnlich einer elektrohydraulischen Bremse, wie sie im PKW-Bereich entwickelt wurde. Der Hydraulikdruck wird dabei durch eine elektrische Hochdruckpumpe bereitgestellt. Die Beaufschlagung des Bremszylinders an der Scheibenbremse erfolgt über ein elektromagnetisches Druckregelventil, welches als Druckbegrenzer im Rücklauf arbeitet. Die Funktionsweise eines solchen Regelventils basiert auf einem Konus, der von einem Elektromagneten betätigt wird und dabei je nach Druckkraft des Magneten bis zu einem bestimmten Flüssigkeitsdruck eine Öffnung verschließt. Die Regelung der Spannung ermöglicht die Anpassung der Druckkraft des Magneten und damit die Druckänderung im Vorlauf. Der Mechanismus ist sehr empfindlich gegen Partikel in der Hydraulikflüssigkeit, weshalb ein Feinfilter vorzuschalten ist. Für den Anschluss an eine Mobilhydraulik (z.B. Traktor) ist das Regelventil laut Hersteller nicht geeignet. Der Schaltplan für einen solchen Aufbau ist in Abb. 37 dargestellt.



- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 1) Reservoir Hydraulikflüssigkeit | 4) Druckregelventil (elektromagnetisch betätigt) |
| 2) Elektrische Hydraulikpumpe     | 5) Drucksensor                                   |
| 3) Feinfilter                     | 6) Hydraulische Scheibenbremse                   |

**Abbildung 37: Schaltplan einer Bremsdruckregelung mit Druckerzeugung und Regelventil**

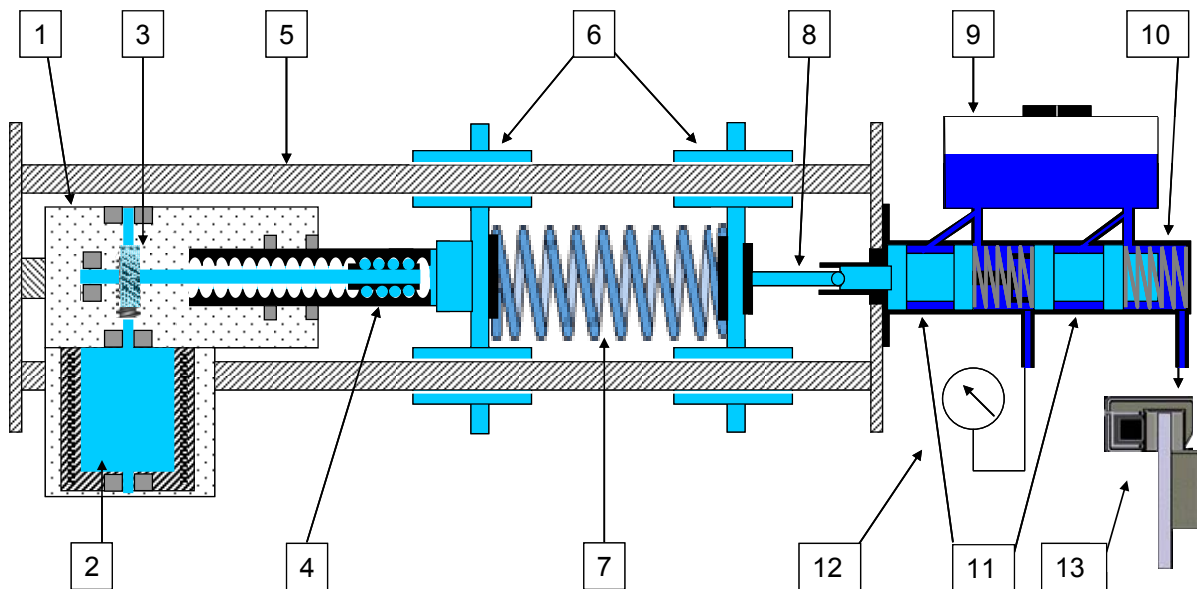
Vorteile dieses Ansatzes sind eine präzise und einfache Regelung über die Spannung sowie eine kurze Reaktionszeit verbunden mit schneller Druckanpassung. Nachteilig sind der relativ aufwendige Aufbau mit eigenem Hydraulikkreislauf sowie der ständige Betrieb der Pumpe, auch wenn nicht geregelt wird.

Eine zweite Möglichkeit zur Regelung des Bremsdruckes ist der hydrostatische Druckaufbau über die Betätigung eines Pumpelements, wie es bei einer konventionellen hydraulischen Bremsanlage der Fall ist. Da der Druckaufbau im Hauptbremszylinder (HBZ) jedoch nicht wie beim Kraftfahrzeug über einen fußbetätigten Hebelmechanismus erfolgen kann, muss der Aufbau so verändert werden, dass eine elektrische Ansteuerung möglich ist.

Ein Ansatz dafür ist die Betätigung des Hauptbremszylinders über einen elektrischen Linearantrieb. Der Antrieb arbeitet dabei nur kurzzeitig, wenn eine Verstellung des Druckes angezeigt ist, und hält in der übrigen Zeit die Position des Zylinders und damit den Druck konstant, weshalb der elektrische Energiebedarf insgesamt sehr niedrig ist. Ein weiterer Vorteil ist, bis auf den Linearantrieb, der Einsatz von bewährten und kostengünstigen Bauteilen aus dem Kraftfahrzeug-Bereich. Gegenüber dem zuvor beschriebenen Ansatz ist jedoch eine etwas längere Reaktionszeit anzunehmen, weil eine Druckänderung durch das Verfahren des Linearantriebes erfolgt. Dies sollte sich für den angestrebten Einsatzzweck

nicht negativ auswirken, da die Vorwärtsbewegung während des Pressprozesses insgesamt relativ langsam abläuft und deshalb keine Anpassung des Druckes in Sekundenbruchteilen erforderlich ist.

Aus den zuvor genannten Gründen wurde sich zur Umsetzung des zweiten Ansatzes entschieden. Als Pumpelement fand ein PKW-HBZ mit einem Kolbendurchmesser von 22 mm Verwendung. Die Querschnittfläche von  $380 \text{ mm}^2$  in Kombination mit einem angestrebten Maximaldruck von 10 MPa erfordert eine maximal aufzubringende Druckkraft von 3,8 kN. Zur Betätigung des HBZ wurde dieser gegenüber eines elektrischen Linearantriebes (Linak LA 36) in eine Halterung eingebaut. Der Aufbau der Druckregleinheit ist in Abb. 38 dargestellt.



- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1) Elektrischer Linearantrieb (6,0 kN) | 8) Stoßel                    |
| 2) Elektromotor (12V)                  | 9) Bremsflüssigkeitsbehälter |
| 3) Schneckengetriebe                   | 10) Hauptbremszylinder (HBZ) |
| 4) Kugelspindeltrieb                   | 11) Kolben                   |
| 5) Halterung mit Stahlwellen           | 12) Drucksensor              |
| 6) Gleitbuchsen                        | 13) Scheibenbremse           |
| 7) Druckfeder                          |                              |

**Abbildung 38: Aufbau der im Versuch eingesetzten Bremsdruckregleinheit**

Die Druckkraft  $F_D$  wird über eine Feder auf die Kolbenstange des HBZ übertragen. Die Druckfeder ist in zwei Quertraversen eingesetzt, die durch Gleitbuchsen auf zwei Stahlwellen verschiebbar gelagert sind. Durch Ausfahren des Linearantriebes werden beide Quertraversen in Richtung des HBZ verschoben und über den Stößel die Bremskolben betätigt. Bei bereits angelegten Bremsbelägen und druckfesten Leitungen beträgt der Kolbenweg bis zum Erreichen des Druckpunktes nur ca. 10 mm. Unter diesem wird bei hydraulischen Bremsanlagen die Kolbenposition verstanden, ab der eine Steigerung von  $F_D$  ausschließlich eine Bremsdruckerhöhung ohne nennenswerten Kolbenweg zur Folge hat. Die zwischen Linearantrieb und Stößel eingebaute Druckfeder wird bei weiterem Ausfahren des Linearantriebes komprimiert und überträgt eine linear zum Federweg  $L$  steigende Druckkraft auf die Bremskolben. Auf diese Weise steigt der Bremsdruck  $P_B$  proportional zum Ausfahrweg an und kann über das Verfahren des Antriebes geregelt werden. Die Verwendung von Federn verschiedener Federkonstanten ermöglicht eine Verschiebung der zu regelnden Druckspanne sowie die Änderung des Ansprechverhaltens der Regelung. Die Druckfeder wirkt gleichzeitig als Druckbegrenzer und Überlastungsschutz.

**Gleichung 18:**  $P_B = \frac{F_D}{A_K}$

$$P_B = \frac{D \cdot L}{A_K}$$

$$P_B = \frac{F \cdot L}{\Delta L \cdot A_K}$$

Der anliegende Bremsdruck  $P_B$  ergibt sich aus dem Quotienten der Druckkraft  $F_D$  und der Kolbenquerschnittsfläche  $A_K$ . Die Federkonstante  $D$  stellt die Steigung der linearen Funktion der Druckkraft  $F_D$  über der Längenänderung  $\Delta L$  der Druckfeder dar.

Die elektrisch verstellbare Einheit ersetzte somit die Handpumpe. Alle weiteren Versuche wurden mit dieser Regelungstechnik durchgeführt, wobei die Bremsdruckverstellung zunächst über manuell bediente Schalter im Messprogramm erfolgte.

#### **3.4.4      Aufbau und Funktion einer Mess- und Regelsoftware**

Um die von den Sensoren gemessenen Daten verarbeiten und aufzeichnen zu können, wurde eine Software entwickelt, mit der im Folgeschritt auch eine automatisierte Bremsdruckregelung umgesetzt werden konnte. Die aktuellen Sensormesswerte werden in der Programmmaske (Abb. 39) in einer Draufsicht der Versuchspresse neben den jeweiligen Sensorsymbolen angezeigt.

Die aus den Abstandswerten der Ultraschallsensoren errechneten Werte für Durchmesser, Höhe und Umfang des Schlauches werden unter der Rubrik „Geometrie“ dargestellt. Der Bremsdruck und der Schlauchumfang in Prozent im Vergleich zum ungedehnten Schlauch sind im Fenster „Automatik“ abgebildet. Die Bestimmung der Schlauchgeometrie in Kombination mit der Vorschubmessung ermöglicht ohne großen Mehraufwand auch Zusatzfunktionen, wie die Berechnung von Durchsatzleistung und Durchsatzmenge, auf die hier nur kurz eingegangen wird. Unter der Rubrik „Durchsatz“ werden Vorschubgeschwindigkeit, Volumendurchsatzleistung und Massedurchsatzleistung angezeigt. Unter „Menge“ werden Schlauchvolumen und Siliergutmasse aufsummiert. Die Bestimmung von Durchsatzleistung und Gesamtmasse erfordert die Eingabe eines durchschnittlichen Dichtewertes, der auf Basis von Erfahrungswerten einzustellen ist.

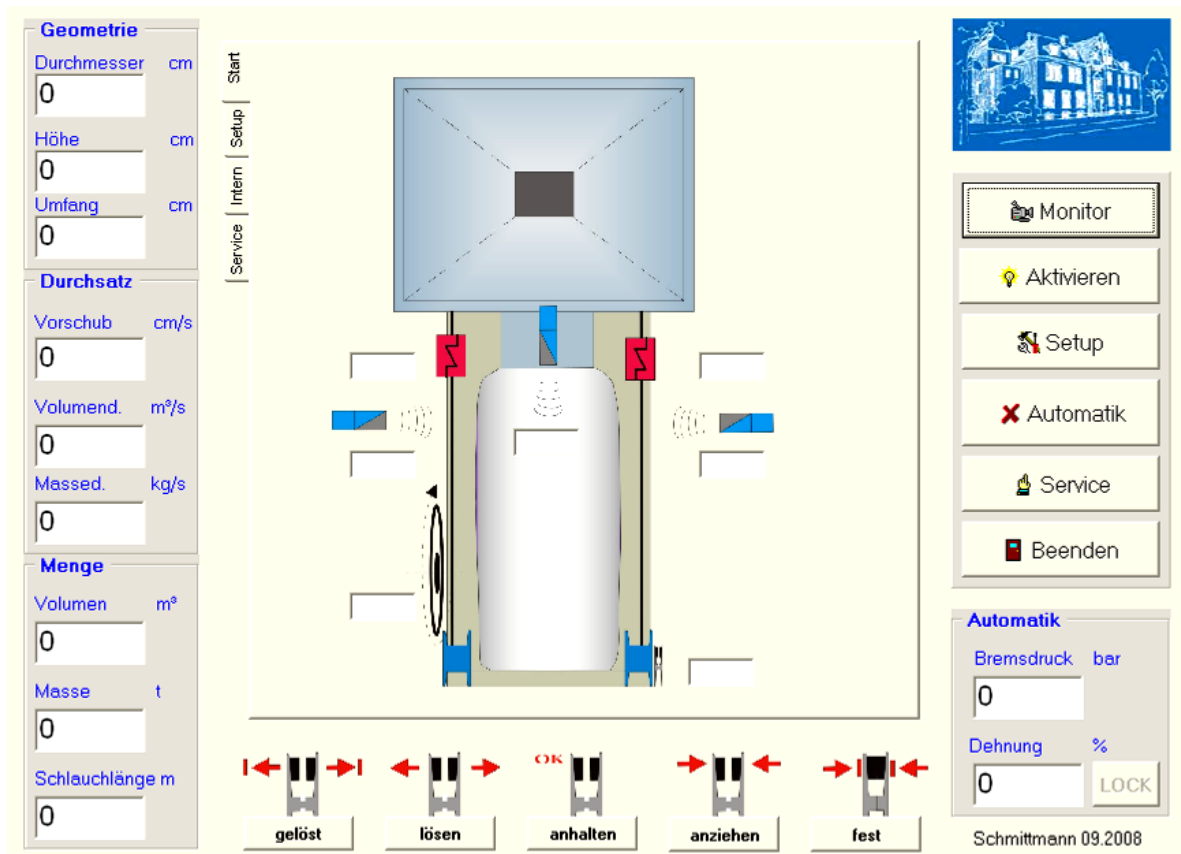


Abbildung 39: Programmmaske der Software zur Pressdruckregelung

Über die unten mittig angeordneten Schaltfelder (Abb. 39) kann der Bremsdruck in folgender Weise manuell geregelt werden:

- Lose : Bremsdruck bis auf 0 MPa reduzieren
- Lösen : Bremsdruck reduzieren, solange das Schaltfeld betätigt ist
- Stopp : Stellmotor anhalten, Bremsdruck konstant halten
- Anziehen: Bremsdruck erhöhen, solange das Schaltfeld betätigt ist
- Fest : Bremsdruck auf Maximalwert erhöhen

Über das Schaltfeld „Aktivieren“ werden die Messung aller Sensoren gestartet und die Schaltfelder für die Bremsdruckregelung freigegeben. Das Schaltfeld Automatik dient zur Aktivierung der automatischen Bremsdruckregelung in Abhängigkeit der unter „Setup“ eingestellten Parameter.

**Geometrie**

Durchmesser cm: 0

Höhe cm: 0

Umfang cm: 0

**Durchsatz**

Vorschub cm/s: 0

Volumend. m³/s: 0

Massed. kg/s: 0

**Menge**

Volumen m³: 0

Masse t: 0

Schlauchlänge m: 0

**Start**

**Setup**

Korrekturfaktor Umfang: 1.04

Druckminimum: 40

Korrekturfaktor Fläche: 1.00

Druckmaximum: 80

Dichte: 1.00

Umfang 100 %: 280

Schaltschwelle: 1.00

**Service**

**Automatik**

Bremsdruck bar: 0

Dehnung %: 0

LOCK

gelöst lösen anhalten anziehen fest

Schmittmann 09.2008

Abbildung 40: Unter Setup einzustellende Parameter zur automatischen Pressdruckregelung

Die im Setup (Abb. 40) dargestellten Korrekturfaktoren für Umfang und Fläche dienen zum Ausgleich der Differenz der aus den Ellipsengleichungen berechneten Werte zu den realen Umfangs- und Flächenmaßen (Kap. 3.4.2). Unter Druckminimum und Druckmaximum werden die Grenzwerte des Bremsdruckes eingestellt. Im Feld „Umfang 100 %“ ist der Schlauchumfang im Originalzustand einzugeben, während im Feld Schaltschwelle die Abweichung in Prozent des Sollwertes des gedehnten Schlauches einzustellen ist, ab der eine Druckanpassung erfolgen soll. Die aktuelle Schlauchdehnung (angegeben in Prozent des Originalumfanges, z.B.: 108 %) wird mit dem Feld „Lock“ als Sollwert nach Beginn der Pressung festgelegt.

Um Verstellereignisse im Betrieb der Versuchsschlauchpresse zu provozieren, wurden Unterschiede im Gesamtwiderstand  $F_T$  simuliert, wie sie in der Praxis z.B. durch unebenen Untergrund unabhängig von der Bremskraft vorkommen. Hierzu wurden kleine Hindernisse (Rampen) vor den Rädern einer Achse des Presswagens angebracht, die unabhängig von der Bremskraft zu einer zusätzlichen Erhöhung des Rollwiderstandes führen. Die Folge ist eine größere Dehnung im betreffenden Schlauchabschnitt bei konstanter Bremskraft.

Die Versuche wurden ohne Bremsdruckanpassung und anschließend mit manuellem Nachregeln auf Basis der am Messrechner abzulesenden Schlauchdehnung durchgeführt.

### 3.4.5 Möglichkeiten zur Umsetzung einer automatischen Bremsdruckregelung

Die Erkenntnisse aus den Pressversuchen ergaben zwei verschiedene Ansätze für einen Regelalgorithmus einer automatischen Bremsdruckanpassung. Der erste Ansatz besteht im interwallweisen Anziehen und Lösen der Bremse. Dabei wird der Bremsdruck zu Beginn so eingestellt, dass sich der Presswagen während der Schlauchfüllung zunächst nicht vorwärts bewegt. Bei Erreichen der gewünschten Schlauchdehnung ist der Bremsdruck soweit abzusenken, dass der Presswagen vorwärts geschoben wird. Die gemessene Schlauchdehnung des folgenden Schlauchabschnittes verringert sich. Beim Unterschreiten eines Minimumwertes wird der Bremsdruck wieder erhöht, sodass die Vorwärtsbewegung stoppt und der Schlauch weiter gefüllt und gedehnt wird. Es besteht auch die Möglichkeit, den Vorschub nach einer vorgegebenen Wegstrecke durch Bremsdruckerhöhung zu stoppen. Die Anpassung der Längenintervalle an das zu verpressende Gut führt letztlich zu einer über die Schlauchlänge gleichmäßigen Schlauchdehnung. Die Presswirkung, in die Tiefe vom Tunnelausgang gesehen, ist wesentlich von den Pressguteigenschaften abhängig, weshalb die Länge des Schlauchabschnittes, in dem noch eine Nachpressung erfolgt, substratabhängig ist.

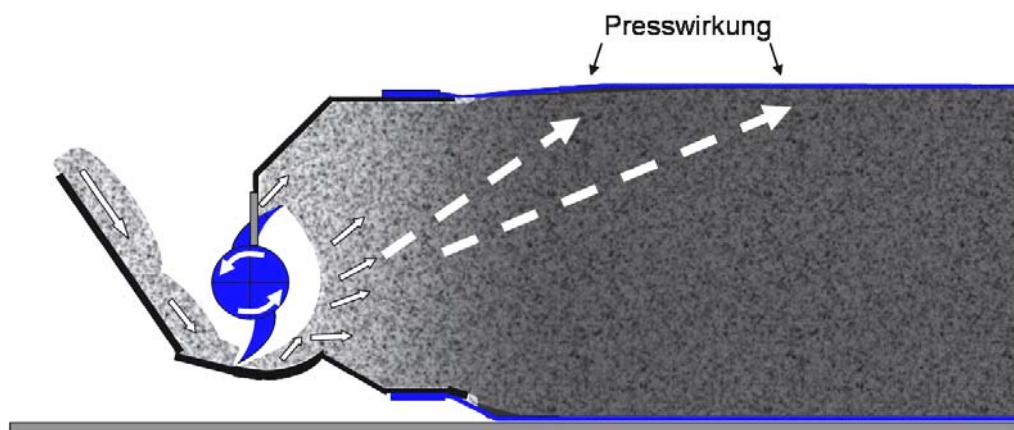


Abbildung 41: Presswirkung vom Tunnelende in die Schlauchtiefe



Dies ist auch bei der Positionierung der Abstandssensoren in Längsrichtung zu berücksichtigen, da die Sensoren möglichst an der Stelle messen sollten, an der die volle Schlauchdehnung gerade erreicht wird.

Die zweite Möglichkeit zur Regelung des Bremsdruckes besteht darin, den Bremsdruck so zu dosieren, dass die Bremse bei der gewünschten Schlauchdehnung langsam durchrutscht. So wird der Schlauch während der fortlaufenden Vorwärtsbewegung gefüllt und gedehnt. Bei Abweichung der Schlauchdehnung über die Grenzen des vorher gewählten Sollbereiches ist der Bremsdruck nachzuregeln. Wenn nach Verstreichen einer bestimmten Zeitspanne die Schlauchdehnung noch außerhalb der Grenzwerte ist, erfolgt ein erneutes Nachregeln. Bei konstanten Bedingungen ist von einem Einpegeln des Bremsdruckes auszugehen.

Die Steuerbefehle werden vom Messrechner auf das Bedienteil des Linearantriebes übertragen, welches den Elektromotor schaltet. Auf diese Weise kann der Bremsdruck ohne manuellen Eingriff angepasst werden. Im Rahmen der Versuche mit Hobelspänen wurden die beiden zuvor beschriebenen Regelverfahren getestet.

Zur Silomaisernte 2008 wurden weitere Pressversuche mit Maishäckselgut unter Verwendung der automatischen Pressdruckregelung durchgeführt. Dabei kam der Regelalgorithmus mit intervallweiser Anbremsung des Presswagens (Methode 1) zum Einsatz.

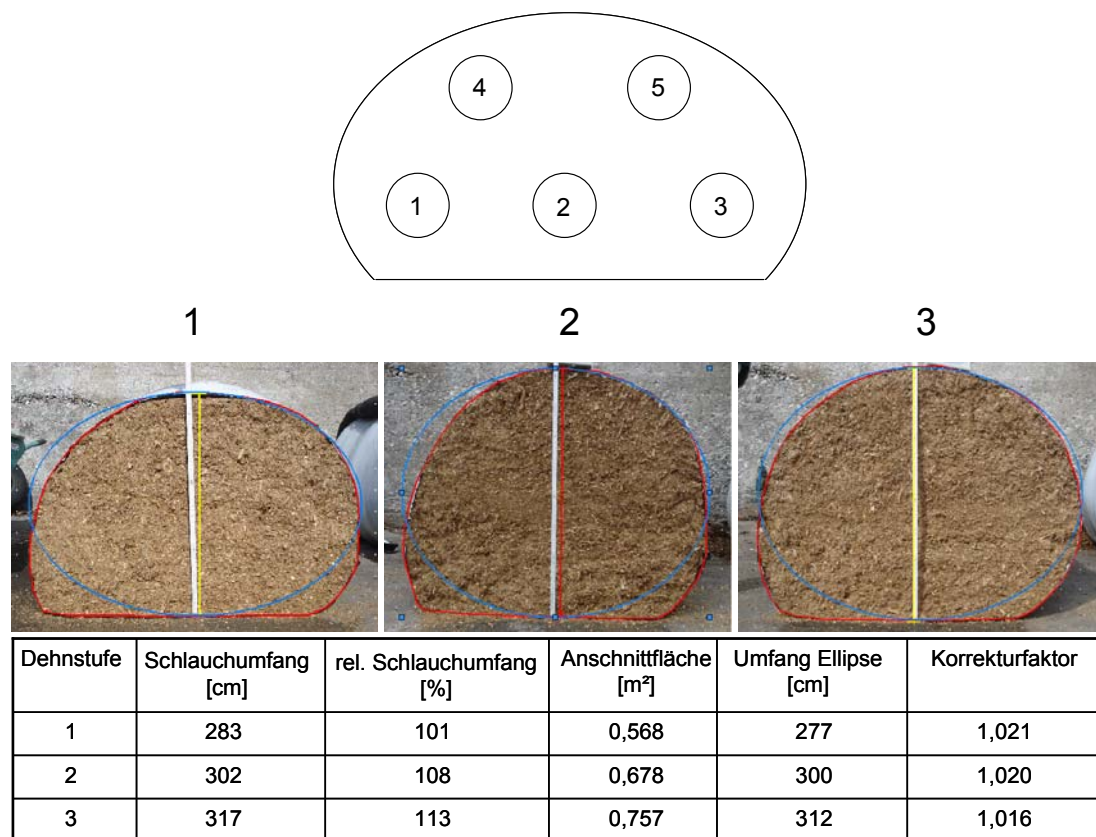
Um den Einfluss des Grades der Schlauchfüllung auf die erzielbare Lagerungsdichte des Siliergutes zu untersuchen, wurde der Sollwert der Schlauchdehnung in drei Stufen variiert. Die jeweils erzielten Lagerungsdichten wurden bei Öffnung der Schläuche durch die Entnahme von Bohrkernen bestimmt und verglichen (s. Kap. 3.1).

### **3.5 Untersuchungen am Versuchsschlauch**

#### **3.5.1 Lagerungsdichte**

Zur Untersuchung der Lagerungsdichte am Versuchsschlauch wurde das unter Kap. 3.1 beschriebene Verfahren zur Entnahme von Bohrkernen eingesetzt. Aufgrund der beim Versuchsschlauch wesentlich kleineren Anschnittfläche konnten jedoch nur fünf statt zehn Beprobungen je Anschnitt durchgeführt werden. Dabei sollte zum einen, ebenso wie bei der Beprobung der Praxissilos, die Lagerungsdichte in Abhängigkeit der Beprobungsposition ermittelt und zum anderen der Einfluss der Schlauchfüllung auf die erzielbare Dichte

untersucht werden. Als Vergleichsmethode wurde eine Volumen- und Massenbestimmung der beprobten Schlauchabschnitte zur Berechnung der Durchschnittsdichte durchgeführt. Zur Vermessung der Querschnittsfläche wurden Fotos der Anschnittflächen mit Längenmaßstäben versehen. Die Querschnittsflächen wurden anschließend unter Verwendung der Software Datinf. Measure ermittelt. In Abb. 42 sind die Beprobungspositionen sowie die Anschnittflächenvermessung dargestellt.



**Abbildung 42: Beprobungspositionen und geometrische Vermessung an den Schlauchanschnitten der drei Dehnstufen**

Das Volumen  $V_s$  des Schlauchabschnittes berechnet sich nach folgender Gleichung:

**Gleichung 19:**  $V_s = A_s \cdot L_s$

Die Siliergutmasse im jeweiligen Schlauchabschnitt wurde durch Verwiegung bestimmt.

### **3.5.2 Einfluss der Pressung auf die Partikelstruktur**

Nach Beobachtungen aus der Praxis führt die Verdichtung von Erntegut durch Schlauchpressen zu einer Änderung der Siliergutstruktur. Es wird angenommen, dass die mechanische Beanspruchung des Erntegutes durch die Zinken des Pressrotors zu einer Nachzerkleinerung oder sogar zu Vermusungen führt. Um eventuelle Veränderungen der Siliergutstruktur nachweisen und quantifizieren zu können, wurde die Partikelzusammensetzung von Maishäckselgut unter Verwendung einer Siebanalyse vor und nach der Pressung bestimmt.

Für die Durchführung der Siebanalyse wurde eine Plansiebmaschine nach KROMER (1993) eingesetzt, die mit Rundlochsieben nach DIN 24041 mit den Lochdurchmessern 40, 25, 15, 10, 6, 3, und 2 mm bestückt war. Der Siebturm wird mit Hilfe eines Elektromotors angetrieben, der diesen über einen Kurbeltrieb und eine Pleuelstange in horizontale Schwingung versetzt. Der Antrieb erfolgt in Intervallen von 3 s Laufzeit und 1 s Ruhezeit. Die gesamte Siebdauer beträgt 3 min je Füllung.

Das für die Siebfractionierung benutzte Erntegut wurde in zwei Stufen getrocknet (4 h bei 60°C anschließend 24 h bei 105°C) und zwischen den Trocknungsgängen umgelagert. Auf diese Weise können agglomerierte Siliergutbestandteile voneinander gelöst werden. Für jeden Siebdurchgang werden 100 g trockenes Siliergut eingewogen. Nach der Fraktionierung werden die Siebe von oben nach unten der Reihe nach entnommen und der Inhalt jeweils verwogen. Die Siebfractionierung wurde mit gepresstem und ungepresstem Häckselgut aus einer Partie in zehnfacher Wiederholung durchgeführt.

### **3.5.3 Messung des Eindringwiderstandes**

Um Rückschlüsse auf den Verlauf der Lagerungsdichte im vertikalen Schnitt durch den Folienschlauch ziehen zu können, wurde die Eindringkraft an den Versuchsschläuchen (Silomais) mit einem motorgetriebenen Penetrometer gemessen. Das Messprinzip, welches ursprünglich für die Messung von Bodenverdichtungen in Ackerböden entwickelt wurde, hatte sich in Untersuchungen von MATTHIESEN (2006) bewährt. Das im Versuch eingesetzte Gerät besitzt eine über Elektromotor und Zahnstange zwangsgetriebene Lanze mit elektronischem Kraftaufnehmer. Die Messung kann online am Messrechner in der Aufzeichnung eines Kraft-Weg-Diagramms verfolgt werden. Die Vorteile des elektrischen Antriebes (gegenüber manuell betriebenen Geräten) liegen zum einen in der vom

Widerstand unabhängigen konstanten Eindringgeschwindigkeit und zum anderen in der exakten Zuordnung der Eindringtiefe. Die technischen Daten des Penetrometers sind in Tab. A. 4 im Anhang zusammengefasst.



**Abbildung 43: Penetrometer am Versuchsschlauch und Beprobungsposition der Dichtbestimmung im Eindringverlauf**

In Abb. 43 sind der Einstichweg und die Positionen der Probenahme dargestellt. Zur sicheren Positionierung des Penetrometers wurde es an den Zinken eines Gabelstaplers befestigt und über den Schlauch gehoben. Nach Starten des Antriebes fährt die im Kraftaufnehmer eingehängte Lanze mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Anschlag aus und wieder in die Ausgangsposition zurück. Bei der maximalen Beprobungstiefe von 700 mm und einer Schlauchhöhe von ca. 820 mm endet die Messung ca. 120 mm über dem Bodenniveau. Der Bereich bis zum Boden kann in diesem Messsystem nicht mit erfasst werden. Parallel zur Messung des Einringwiderstandes wurden Bohrkerne zum Vergleich an jeweils drei Positionen im Einringverlauf entnommen.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der in Kap. 3 beschriebenen Versuche aufgeführt. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der Dichteuntersuchung graphisch und in Tabellenform dargestellt. Im Weiteren wird auf die im Labor untersuchten Zusammenhänge zur Silageporosität eingegangen, während im letzten Teil des Kapitels die Ergebnisse der Pressversuche mit der Versuchsschlauchpresse vorgestellt werden.

### 4.1 Lagerungsdichte in Siloschläuchen

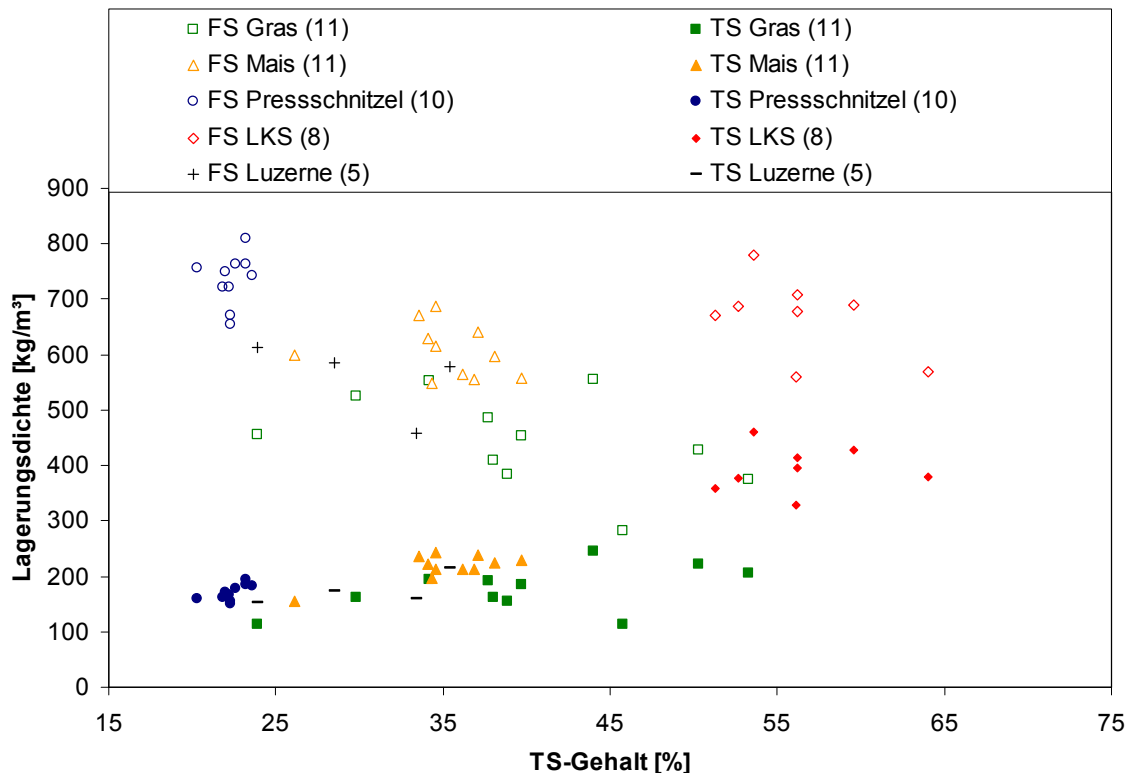
Im Rahmen der Felduntersuchung zum Stand der Verdichtung von Silage im Folien-schlauch wurde die Lagerungsdichte an 45 Schlauchsilagen verschiedener Siliergüter untersucht.

#### 4.1.1 Einfluss des TS-Gehaltes

In Abb. 44 sind die gemessenen Dichtewerte, bezogen auf Frisch- und Trockensubstanz über den TS-Gehalt, aufgetragen. Ein Messpunkt repräsentiert das arithmetische Mittel der 10 Beprobungspositionen eines Schlauchsilos. Die große Spannweite des TS-Gehaltes (21-64 %) zeigt zum einen deutliche Unterschiede zwischen den Siliergütern und zum anderen auch erhebliche Differenzen zwischen den verschiedenen Silagen eines Siliergutes. Die Frischsubstanz-Lagerungsdichte der Silagen lag in einer Spannbreite von 300 bis 850 kg m<sup>-3</sup>, während bezogen auf die Trockensubstanz Lagerungsdichten von 120 bis 480 kg m<sup>-3</sup> gemessen wurden.

Die Unterschiede innerhalb eines Silagegutes sind stark von dessen Homogenität gekennzeichnet. Pressschnitzel als Koppelprodukt der industriellen Rübenverarbeitung weisen mit TS-Gehalten von 21-24 % und konstanter Partikelstruktur sehr homogene Pressguteigenschaften auf, was sich auch in einer vergleichsweise einheitlichen Lagerungsdichte widerspiegelt. Die untersuchten Gras- und Luzernesilagen hatten hingegen zum einen TS-Gehalte in einer weiten Streubreite und zum anderen, durch die unterschiedliche Ernte-technik, stark variierende Partikelstrukturen. Die gemessenen TS-Lagerungsdichten lagen mit 120 bis 280 kg m<sup>-3</sup> in einem großen Streubereich, was auch die Varianzkoeffizienten von 23,3 bzw. 16,2 % zeigen. Die beprobten Mais- und Lieschkolbenschrotsilagen wiesen TS-Gehalte von 26 bis 36 bzw. 51 bis 64 % bei jeweils relativ einheitlicher Partikelstruktur

auf. Die Frisch- bzw. Trockensubstanzdichten lagen im Fall von Silomais im Bereich von 560 bis 720 kg FS m<sup>-3</sup> und 160 bis 260 kg TS m<sup>-3</sup>. Das aufgrund der fehlenden Restpflanze wesentlich trockenere Lieschkolbenschrot weist Frischsubstanzdichten von 560 bis 860 kg FS m<sup>-3</sup> auf, die mit hohen TS-Dichten von 330 bis 480 kg TS m<sup>-3</sup> einhergehen.



**Abbildung 44: Arithmetisches Mittel der Frisch- und Trockensubstanzdichten der untersuchten Schlauchsilagen über dem TS-Gehalt (n = 10)**

Bis auf Lieschkolbenschrot wiesen alle Siliergüter mit zunehmendem TS-Gehalt tendenziell steigende Trockensubstanzdichten auf, während die Frischsubstanzdichten bei allen Siliergütern, außer Pressschnitzeln, mit sinkendem Wassergehalt abnahmen. Die Steigungen der Regressionsgeraden bezüglich der Trockensubstanzdichte lagen zwischen 2,5 bei Gras und bis zu 9,8 im Fall von Pressschnitzeln, wobei die Bestimmtheitsmaße auf niedrigem Niveau von 0,27 bis 0,48 lagen, sodass maximal 50 % der Dichtewerte durch den TS-Gehalt zu erklären sind (Tab. 7).

Bei Mais und Pressschnitzeln gibt es nach dem Modell der linearen Regression einen signifikanten Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Trockensubstanzlagerungsdichte ( $\alpha < 0,05$ ). Bei den Siliergütern Gras und Luzerne ist dieser Zusammenhang nicht signifikant, während im Fall von LKS überhaupt kein Einfluss des TS-Gehaltes auf die

Lagerungsdichte im gemessenen TS-Bereich zu erkennen ist. Die Mittelwerte der Lagerungsdichte und die Kenngrößen der linearen Regression sind in Tab. 7 aufgeführt.

**Tabelle 7: Mittelwertvergleich der in Schlauchsilos verschiedener Silagen gemessenen Lagerungsdichten und deren jeweilige Abhängigkeit vom TS-Gehalt des Siliergutes**

Silagegut	Deskriptive Statistik			Regression		
	Mittelwert [kg TS m <sup>-3</sup> ]	Standard- abweichung [kg TS m <sup>-3</sup> ]	Variations- koeffizient [%]	Regres- sionskoeffizient B	Korrigiertes R <sup>2</sup>	Signifikanz $\alpha$
<b>Gras</b>	177,3	41,4	23,1	2,48	0,187	0,101
<b>Mais</b>	211,8	28,6	12,8	5,63	0,421	0,018*
<b>Press- schnittzel</b>	170,7	14,12	8,3	9,88	0,348	0,043*
<b>LKS</b>	395,3	47,4	12	0,048	0	0,992
<b>Luzerne</b>	175,2	28,4	16,2	3,81	0,216	0,309

\* = Das Modell der linearen Regression ist signifikant;  $\alpha \leq 0,05$

Außer durch den TS-Gehalt eines Siliergutes wird die durchschnittliche Lagerungsdichte von anderen Guteigenschaften beeinflusst, wie Partikelstruktur und Rohfasergehalt, die sich erheblich auf dessen Verdichtungs- und Rückfederungsverhalten auswirken. Ein weiterer Effekt geht von der verwendeten Presstechnik und deren Einstellung aus. Zusätzlich ist die Variabilität der Guteigenschaften bei den Siliergütern Gras und Luzerne am größten, sodass bei diesen der Einfluss des TS-Gehaltes auf die Lagerungsdichte durch andere Faktoren am stärksten überlagert wird.

Aus der geringen Steigung der Regressionsgerade ist jedoch auch die zunehmende Sperrigkeit der Siliergüter abzuleiten, die einer effektiven Verdichtung durch die Presswerkzeuge bei zunehmender Abreife entgegenwirkt. Im Fall von LKS ist kein Anstieg der TS-Dichte mit zunehmendem TS-Gehalt festzustellen (Abb. 44). Der abnehmende Volumenanteil des Wassers kann offenbar nicht durch eine dichtere Lagerung der Festsubstanz eingenommen werden, was zu einer Zunahme der Porosität der Silage führt.

#### 4.1.2 Dichteverteilung über den Schlauchquerschnitt

Gegenstand der Untersuchung war sowohl die Lagerungsdichte an verschiedenen Siliergütern mit jeweils unterschiedlichem TS-Gehalt als auch die Dichteverteilung über die Schlauchquerschnittsfläche. Durch Probenahme an 10 Messpositionen, wie in Abb. 31 dargestellt, konnte die Lagerungsdichte differenziert über den Schlauchquerschnitt gemessen werden. In Tab. 8 sind die Mittelwerte der jeweiligen Siliergüter für alle 10 Messpositionen aufgeführt und signifikante Unterschiede nach dem „Post Hoc Tukey test“ gekennzeichnet. Die Zuordnung der Messpositionen ist Abb. 45 zu entnehmen. Für den Vergleich der Dichte an den verschiedenen Messpositionen wurde das arithmetische Mittel der Frischsubstanzdichten gewählt, da die relative Abweichung der Trockensubstanzdichten zwischen den Schlauchsilos, durch den Einfluss des TS-Gehaltes, größer ist als die der Frischsubstanzdichten. Bei einem Vergleich auf Basis der Trockensubstanz würde der Einfluss der Messposition stärker überlagert und dadurch die messpositionsbedingten Unterschiede relativiert.

Grundsätzlich existierten, wie zu erwarten, bei allen Siliergütern messpositionsbedingte Unterschiede in der Lagerungsdichte. Diese waren je nach Siliergut aber nur teilweise signifikant. Je homogener die Silierguteigenschaften sind, desto klarer ist der Einfluss der Messposition in der jeweiligen Stichprobe. Im Fall des homogenen Siliergutes der Pressschnitzel ist eine Einteilung der Werte in drei signifikant verschiedene Gruppen möglich, während sich bei den sehr inhomogenen Pressgütern Gras und Luzerne lediglich die beiden oberen Positionen (9 und 10) von denen unten in der Kernzone (2 und 3) bedeutsam unterscheiden. Bei den Mais- und Lieschkolbenschrotsilagen ergeben sich insgesamt drei Gruppen. Im Fall von Silomais sind die Positionen 2 und 3 von allen Positionen, außer von Position 6 und 7, signifikant verschieden, während sich die Positionen 1, 4, 5 und 8 nur von den Positionen 2 und 3 unterscheiden. Die Positionen 6 und 7 unterscheiden sich bedeutsam von den oberen Positionen 9 und 10. Bei Lieschkolbenschrot ergibt sich eine gleiche Gruppeneinteilung, bis auf die Positionen 6 und 7. Letztere unterscheiden sich nicht signifikant von den oberen Messpositionen 9 und 10. Hier fand allerdings auch eine Beprobung von nur 7 Schlauchsilos statt, wohingegen bei Mais 12 Schlauchsilos untersucht wurden, was sich auf die Berechnung der Signifikanz-Grenzen auswirkt.



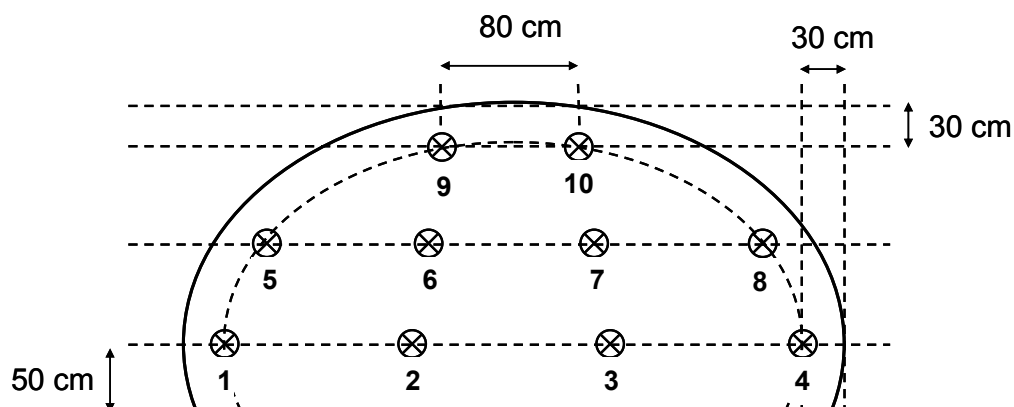


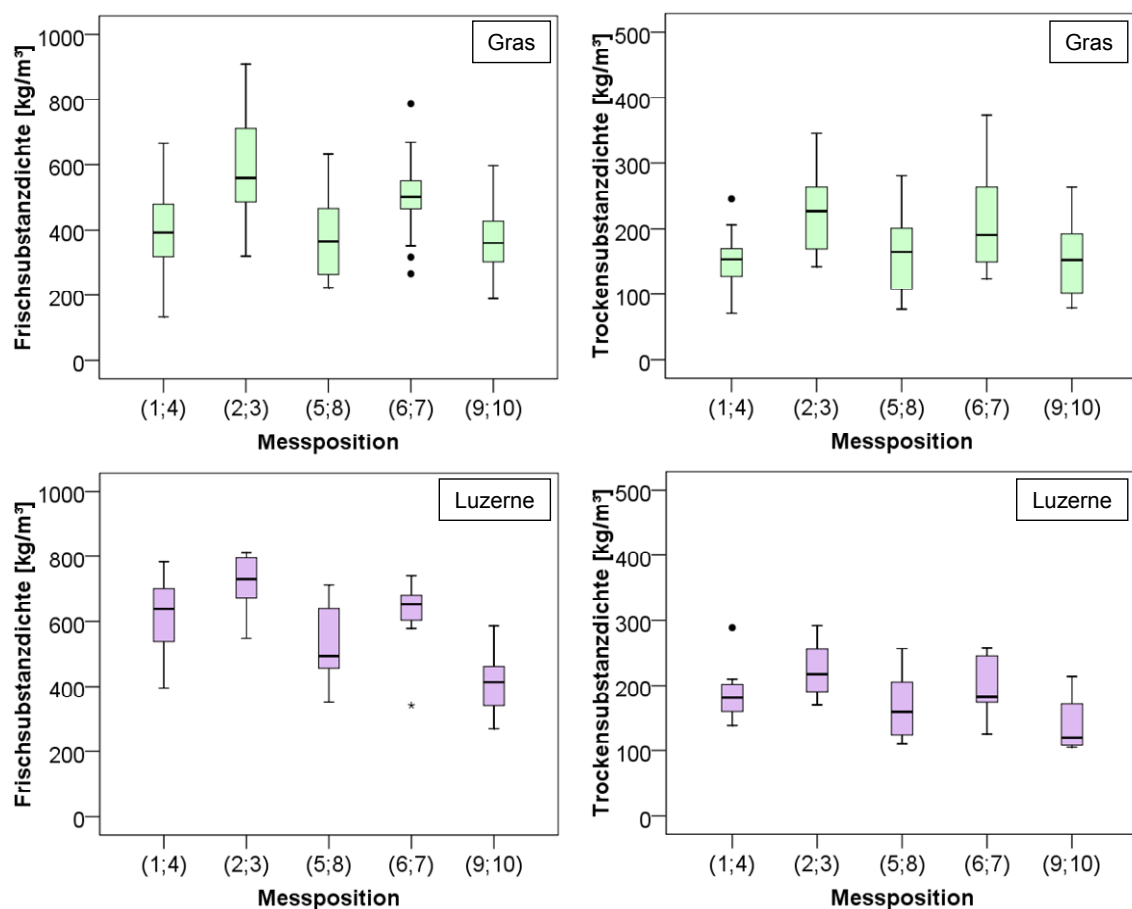
Abbildung 45: Zuordnung der Messpositionen am Schlauchquerschnitt

Tabelle 8: Frischsubstanzdichte der verschiedenen Siliergüter unterteilt nach der Messposition

Messposition	Mittelwert	Lagerungsdichte [kg FM m <sup>-3</sup> ] an den Messpositionen der beprobten Silagen				
		Gras (n=10)	Silomais (n=12)	Pressschnitzel (n=10)	LKS (n=7)	Luzerne (n=6)
1	Ø	398 <sup>ab</sup>	593 <sup>ab</sup>	737 <sup>b</sup>	698 <sup>abc</sup>	622 <sup>ab</sup>
	S	155	82	79	139	168
2	Ø	570 <sup>a</sup>	739 <sup>c</sup>	960 <sup>c</sup>	809 <sup>c</sup>	719 <sup>b</sup>
	S	142	78	59	100	73
3	Ø	572 <sup>a</sup>	725 <sup>c</sup>	945 <sup>c</sup>	786 <sup>c</sup>	721 <sup>b</sup>
	S	168	89	52	111	120
4	Ø	399 <sup>ab</sup>	579 <sup>ab</sup>	741 <sup>b</sup>	660 <sup>abc</sup>	607 <sup>ab</sup>
	S	152	91	72	134	149
5	Ø	380 <sup>ab</sup>	574 <sup>ab</sup>	640 <sup>a</sup>	609 <sup>ab</sup>	551 <sup>ab</sup>
	S	133	71	75	149	164
6	Ø	546 <sup>ab</sup>	681 <sup>bc</sup>	816 <sup>b</sup>	728 <sup>abc</sup>	597 <sup>ab</sup>
	S	158	87	50	96	176
7	Ø	485 <sup>ab</sup>	671 <sup>bc</sup>	806 <sup>b</sup>	748 <sup>abc</sup>	642 <sup>ab</sup>
	S	134	84	35	126	55
8	Ø	409 <sup>ab</sup>	567 <sup>ab</sup>	577 <sup>a</sup>	608 <sup>ab</sup>	508 <sup>ab</sup>
	S	141	58	67	103	82
9	Ø	368 <sup>b</sup>	512 <sup>a</sup>	569 <sup>a</sup>	574 <sup>a</sup>	444 <sup>a</sup>
	S	127	44	64	111	103
10	Ø	359 <sup>b</sup>	503 <sup>a</sup>	562 <sup>a</sup>	569 <sup>a</sup>	397 <sup>a</sup>
	S	82	53	61	73	91
Insgesamt	Ø	454	615	735	679	579
	S	158	108	153	137	149

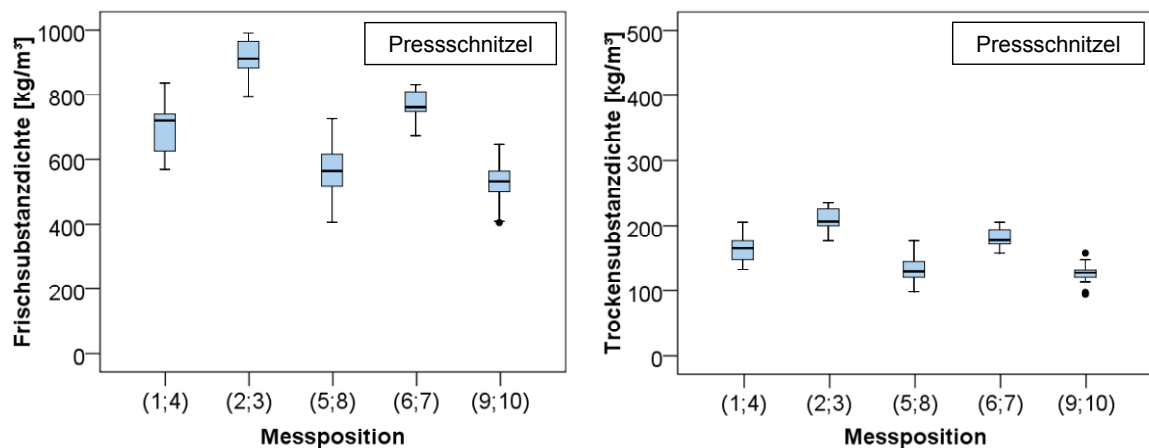
<sup>abc</sup> kennzeichnet signifikante Unterschiede in einer Spalte nach;  $\alpha \leq 0,05$ ; Tukey-Test

Die Ergebnisse zeigen eine symmetrische Dichteverteilung über die Schlauchanschnittsflächen. Bei keinem der untersuchten Siliergüter existierten erhebliche Unterschiede zwischen den jeweils gegenüberliegenden Beprobungspositionen. Für die weitere Darstellung der messpositionsbezogenen Lagerungsdichten werden deshalb die jeweils an der senkrechten Mittelachse gespiegelten Messpositionen zusammengefasst (1 und 4, 2 und 3, 5 und 8, 6 und 7 sowie 9 und 10). In den Abbildungen 46 bis 48 sind die Werte für die Frisch- und Trockensubstanzdichte, aufgeteilt nach Messpositionen, im Boxplot dargestellt. Die Spannweite der Box gibt dabei die Werte des zweiten und dritten Quartils wieder, während die Endpunkte der Whisker jeweils den Maximum- und Minimumwert in einem Abstand bis zum 1,5-fachen der Boxspannbreite darstellen. Werte, die nicht in dieser Spannweite liegen, werden einzeln als Punkt markiert, wobei extreme Ausreißer, die sich außerhalb der dreifachen Boxspannbreite befinden, als Stern gekennzeichnet sind. Sind keine Ausreißer vorhanden, stellen die Endpunkte der Whisker die Extremwerte dar.



**Abbildung 46:** Spannweite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt für Gras und Luzerne

Sowohl die Frischsubstanzdichten als auch die Trockensubstanzdichten wiesen bei den Siliergütern Gras und Luzerne große Spannbreiten an jeder Messposition auf. Bis auf die Positionen (6; 7) und (9; 10) bei Luzerne liegen die Mediane jeweils etwa mittig in der Box, was eine Normalverteilung der Werte zeigt. Die höchsten Lagerungsdichten von durchschnittlich  $570 \text{ kg FS m}^{-3}$  bei Gras und  $700 \text{ kg FS m}^{-3}$  bei Luzerne wurden im unteren Kernbereich (Position 2; 3) erzielt. Die große Spannbreite der Lagerungsdichten hat jedoch zur Folge, dass die zwischen den Messpositionen existierenden Dichteunterschiede, bis auf die zwischen „Kern unten“ (2; 3) und „Oben“ (9; 10), nicht statistisch abzusichern waren (Tab. 8). Die Differenz der Lagerungsdichten zwischen „Kern unten“ und „Oben“ lag bei beiden Siliergütern bei ca. 30 %. Die Positionen am unteren und mittleren Rand (1; 4 und 5; 8) wiesen deutlich niedrigere Dichtewerte um ca. 20 % unter denen des unteren Kernbereichs auf, wohingegen im oberen Kernbereich (6; 7) die Lagerungsdichten nur um 10 bis 15 % verringert waren.



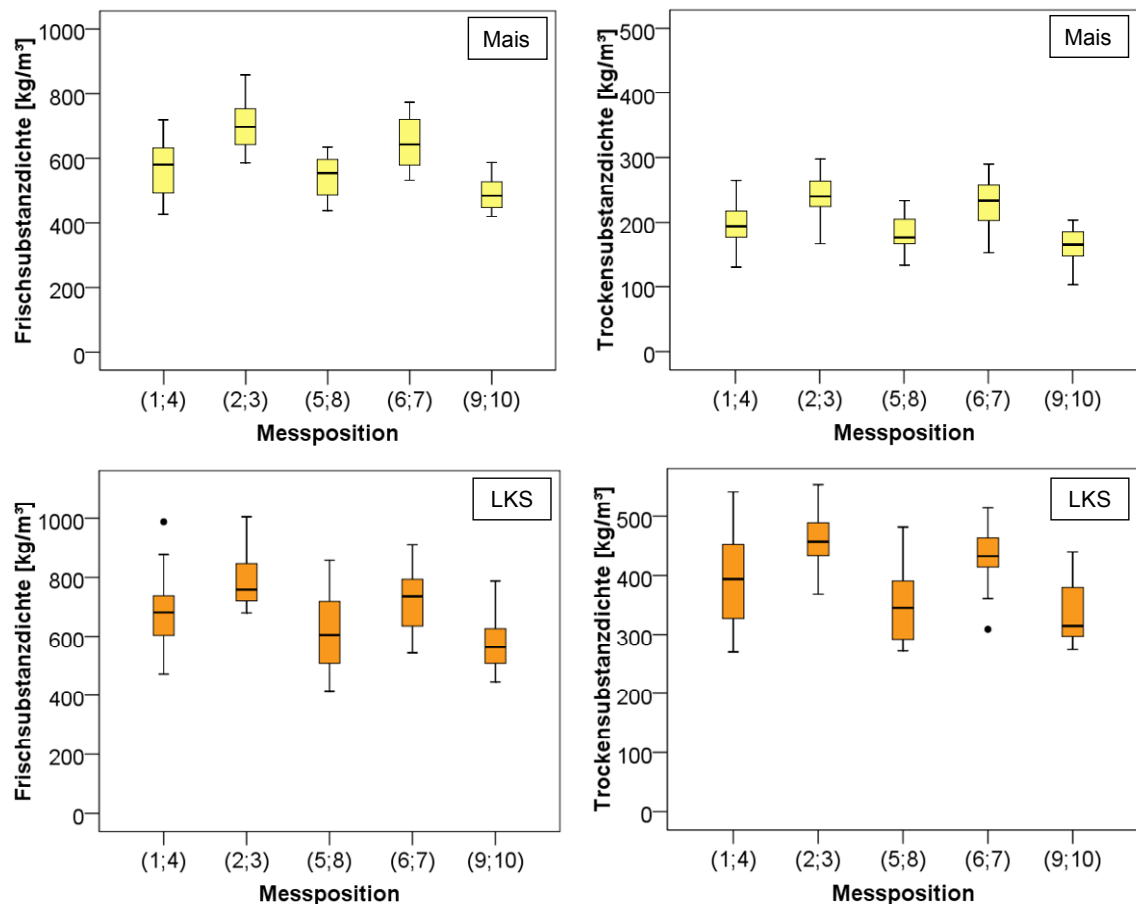
**Abbildung 47: Spannbreite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) bei Pressschnittsilage in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt**

Die untersuchten Pressschnittsilagen wiesen, im Vergleich zu den anderen Siliergütern, mit mittleren Werten von  $570$  bis  $950 \text{ kg FS m}^{-3}$  die höchsten Frischsubstanzdichten auf. Bedingt durch den niedrigen TS-Gehalt liegen die TS-Dichten jedoch nur bei  $150$  bis  $220 \text{ kg TS m}^{-3}$ . Die Spannbreite der Werte, bezogen auf die jeweilige Beprobungsposition, ist die niedrigste im Vergleich, wohingegen die Dichteunterschiede zwischen den Messpositionen eine eindeutige Abstufung ergeben.

Die Differenz zwischen den Beprobungspositionen im unteren Kern und denen am oberen Rand ist bei Pressschnitzeln mit fast 40 % die höchste. Die Spannbreite der im Randbereich liegenden Beprobungspositionen (1; 4, 5; 8 und 9; 10) ist höher als die der Messpositionen im Kern. Ein Grund dafür könnte in einer geringfügigen Abweichung der Messposition am jeweiligen Schlauch liegen, was im Randbereich einen deutlich stärkeren Einfluss auf das Ergebnis hat als im Kern der Schlauchsilos. Die aufgrund der einheitlichen Pressguteigenschaften gute Vergleichbarkeit der beprobten Silagen ermöglicht die Darstellung der Lagerungsdichte über der Messposition mit nur geringem Einfluss der pressgut-spezifischen Unterschiede, wie diese bei den anderen Siliergütern vorhanden sind. Deshalb ist die Verteilung der Lagerungsdichte über den Schlauchquerschnitt beim Siliergut Pressschnitzel am eindeutigsten aufzuzeigen. Die quantitativen Unterschiede sind hierbei gegenüber Siliergütern höheren TS-Gehaltes größer. Ob die Unterschiede vom Kern zum Rand auch schon direkt nach der Pressung, bedingt durch die Gutverdichtung, größer sind als bei anderen Siliergütern, konnte mit den durchgeführten Messungen nicht beurteilt werden, da diese erst während der Entnahmephase, also nach der Silierung, stattfanden.

Bei den Siliergütern Mais und Lieschkolbenschrot sind die Spannbreiten der Lagerungsdichte an den verschiedenen Messpositionen wesentlich geringer als bei Gras und Luzerne, jedoch größer als bei den zuvor diskutierten Pressschnitzeln. Die siliergutspezifischen Unterschiede liegen bei beiden Maisprodukten hauptsächlich im TS-Gehalt sowie im Kornanteil, wohingegen die Partikelstruktur durch die Verarbeitung auf kurze Schnittlänge im Feldhäcksler als vergleichsweise einheitlich anzusehen ist. Die Frischsubstanzlagerungsdichten liegen bei beiden Maisprodukten zwischen ca.  $760 \text{ kg FS m}^{-3}$  im unteren Kernbereich und  $580 \text{ kg FS m}^{-3}$  im oberen Randbereich.

Aufgrund des wesentlich höheren Kornanteils und des dadurch gesteigerten TS-Gehaltes, ist die Trockensubstanzdichte beim Lieschkolbenschrot mit Werten von 330 bis  $460 \text{ kg TS m}^{-3}$  um ca. 80 % höher als die des Silomais. Bei diesem liegen die Trockensubstanzdichten im Kernbereich bei  $240 \text{ kg TS m}^{-3}$ , während im oberen Randbereich Werte um  $175 \text{ kg TS m}^{-3}$  gemessen wurden. Die prozentuale Differenz zwischen Kernbereich und oberem Rand ist bei beiden Maisprodukten mit ca. 25 % im Vergleich zu den anderen Siliergütern am niedrigsten.



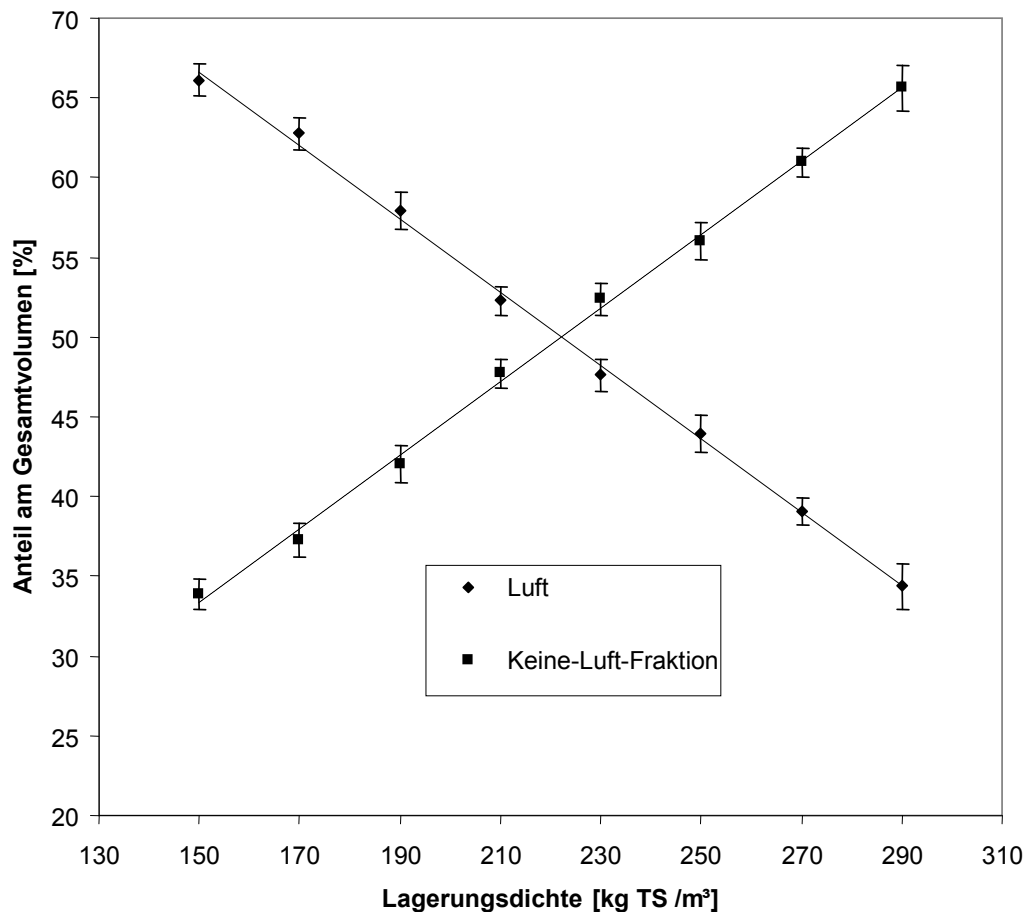
**Abbildung 48:** Spannweite der Frischsubstanzdichte (links) und Trockensubstanzdichte (rechts) in Abhängigkeit der Messposition am Schlauchanschnitt bei Mais und Lieschkolbenschrot

## 4.2 Silageporosität in Abhängigkeit von Partikelstruktur, Lagerungsdichte und TS-Gehalt

Neben der Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Porosität von Siliergütern bei definierter Lagerungsdichte, galt es, in den Versuchen den Zusammenhang zwischen TS-Gehalt und Porosität sowie einen eventuellen Einfluss der Partikelstruktur experimentell zu untersuchen. Dass zwischen Lagerungsdichte und Porosität eine umgekehrt lineare Beziehung existiert, war aufgrund der physikalischen Zusammenhänge zu erwarten.

In Abb. 49 sind der Anteil der Festsubstanz zuzüglich des Wassers (keine-Luft-Fraktion) und die Porosität am Beispiel von Mais-Siliergut (6 mm theoretische Häcksellänge, 38,56 % TS-Gehalt) über der Lagerungsdichte aufgetragen. Da beide Fraktionen zusammen den Proberaum zu 100 % ausfüllen und die Geraden jeweils die Grenzen 0 und 100

besitzen, liegt der Schnittpunkt bei 50 %, was bei diesem Siliergut einer Lagerungsdichte von  $223 \text{ kg TS m}^{-3}$  entspricht.



**Abbildung 49: Volumenanteil des Porenvolumen gegenüber dem Anteil von Festsubstanz plus Wasser über der Lagerungsdichte von Silomais (38 % TS)**

Die in Abb. 49 aufgeführten Werte der Standardabweichung ergeben sich sowohl aus den Messwiederholungen durch erneuten Druckaufbau in den jeweils selben Proben, als auch den Wiederholungen mit einer erneuten Verdichtung von Siliergut. Die Standardabweichung lag bei allen Versuchen auf dem hier dargestellten Niveau, weshalb in den folgenden Graphiken auf deren Abbildung verzichtet wird.

#### 4.2.1 Porosität in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und TS-Gehalt

In den Abbildungen 50 und 51 sind die arithmetischen Mittelwerte der Porosität über den jeweiligen Dichtestufen aufgetragen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Porositätswerte der Silagen mit kleiner (6 mm) und mit großer (12 mm) Häcksellänge in zwei Diagrammen separat dargestellt.

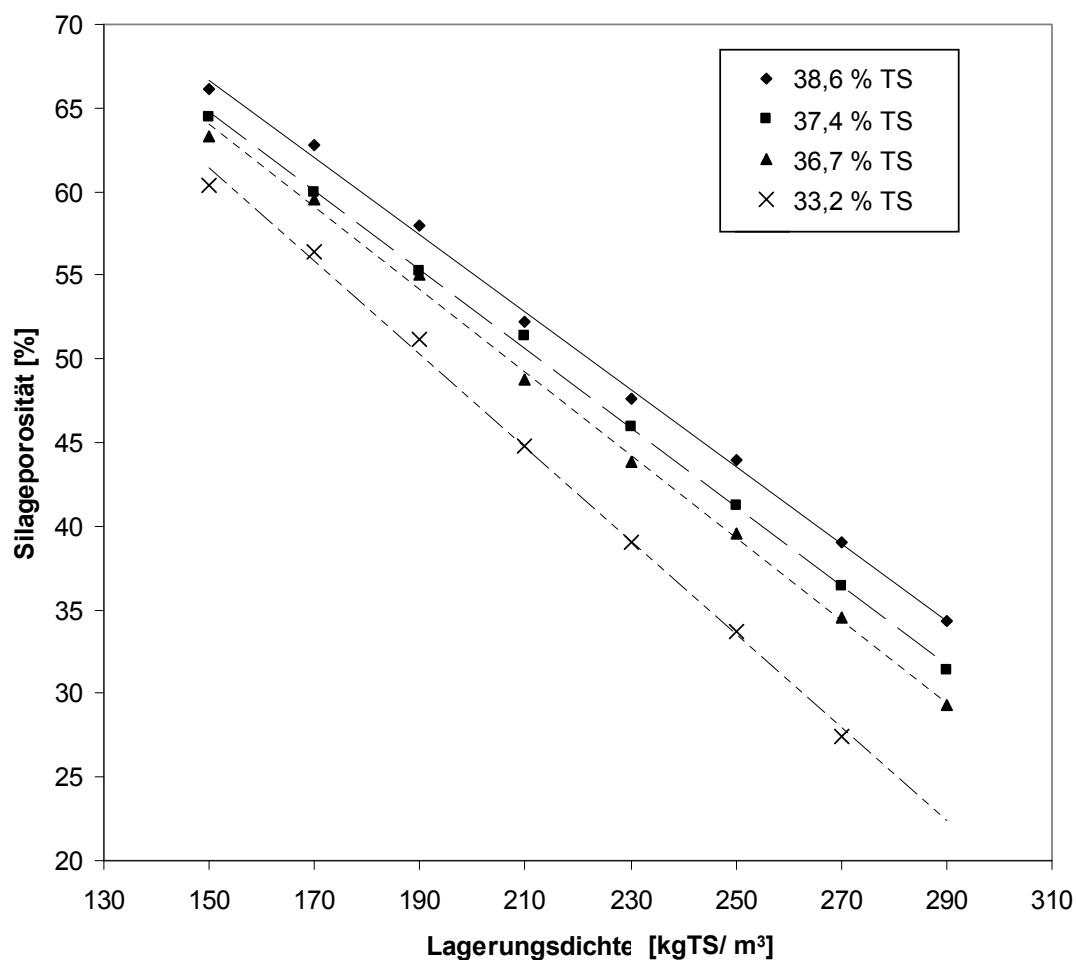
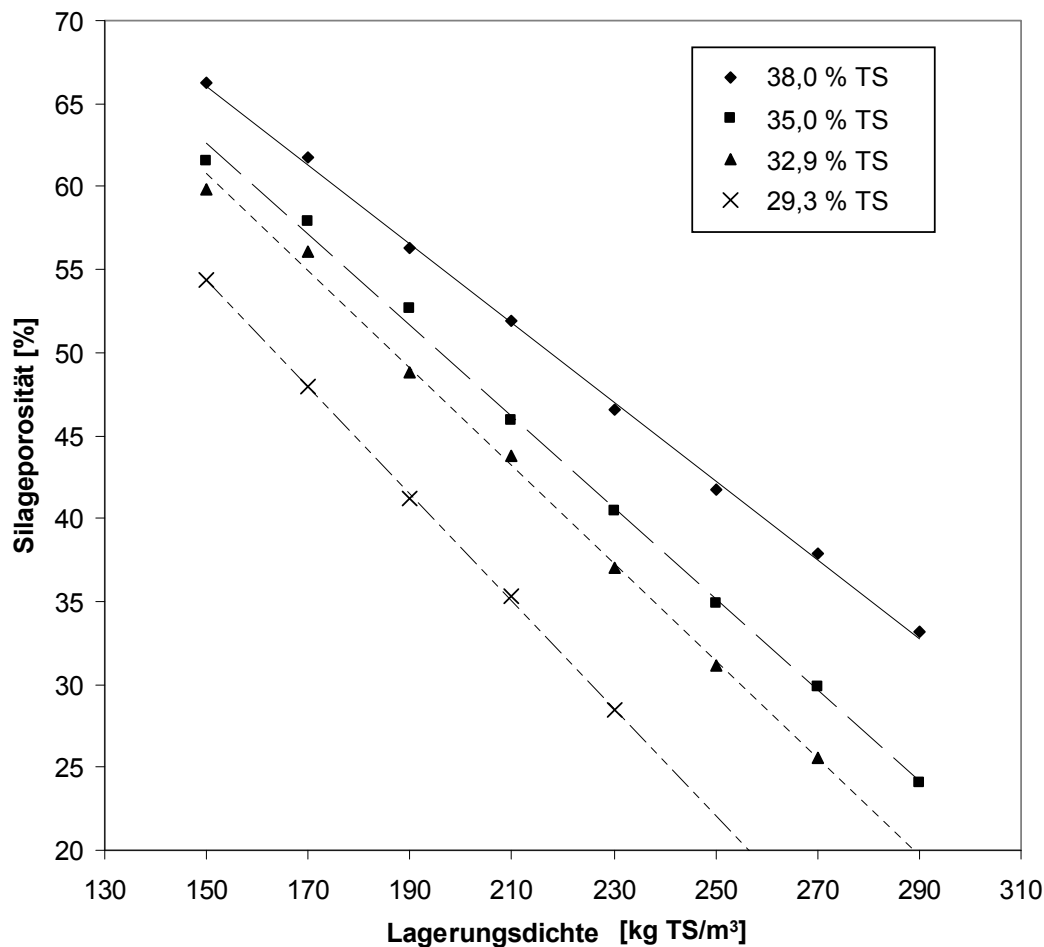


Abbildung 50: Porositätswerte von Maissilagen verschiedenen TS-Gehaltes über der Lagerungsdichte (kurze Häcksellänge)

Die kurzgehäckselten Silagen wiesen TS-Gehalte von 38,6 %, 37,4 %, 36,7 % und 33,2 % auf. In gleicher Reihenfolge hatten die Silagen bei einer Lagerungsdichte von 150 kg TS m<sup>-3</sup> eine mittlere Porosität von 66,1 %, 64,4 %, 63,3 % bzw. 60,3 %. Mit zunehmender Lagerungsdichte fiel die Porosität linear ab. Bei einer Lagerungsdichte von 290 kg TS m<sup>-3</sup> lagen die mittleren Porositäten der Silagen schließlich bei 34,4 %, 31,4 % bzw. 29,3 %. Die Silage mit 33,2 % TS konnte aufgrund von austretendem Sickersaft nur

bis zu  $270 \text{ kg TS m}^{-3}$  analysiert werden. Der mittlere Porositätswert betrug in diesem Fall 27,4 %. Bei einer Kompression auf höhere Dichtewerte würde die Porosität weiter abnehmen, allerdings ist dabei von verstärktem Sickersaftaustritt auszugehen. Unter Praxisbedingungen im Silo sind Trockensubstanzdichten jenseits von  $290 \text{ kg TS m}^{-3}$  kaum zu realisieren, weshalb die Porositätswerte in diesem Bereich nicht relevant sind.



**Abbildung 51: Porositätswerte von Maissilagen verschiedenen TS-Gehaltes über der Lagerungsdichte (lange Häcksellänge)**

Die langgehäckselten Silagen wiesen TS-Gehalte von 38,0 %, 35,0 %, 32,9 % und 29,3 % auf. Unter Beibehaltung der Reihenfolge lagen die arithmetischen Mittel der Porositäten bei einer Lagerungsdichte von  $150 \text{ kg TS m}^{-3}$  bei 66,2 %, 61,6 %, 59,8 % bzw. 54,4 %. Mit zunehmender Lagerungsdichte sank die Porosität linear.

Bei einer Lagerungsdichte von  $290 \text{ kg TS m}^{-3}$  lagen die Werte der beiden trockeneren Silagen bei 33,1 % und 24,1 %. Die Silagen mit 32,9 und 29,3 % TS konnten aufgrund von



austretendem Sickersaft ebenfalls nicht bis  $290 \text{ kg TS m}^{-3}$  untersucht werden. Deshalb wurde die Silage mit 32,9 % TS-Gehalt bis auf  $270 \text{ kg TS m}^{-3}$  und die Silage mit 29,3 % TS-Gehalt bis auf  $250 \text{ kg TS m}^{-3}$  verdichtet. Die mittleren Porositäten lagen hier bei 25,6 % bzw. 28,4 %.

Aus beiden Abbildungen (50 und 51) ist zu entnehmen, dass die Porosität, wie zu erwarten, linear mit zunehmender Lagerungsdichte abnimmt, wohingegen steigende TS-Gehalte aufgrund der abnehmenden Volumenverdrängung des Wasseranteils eine Erhöhung der Porosität bei gleicher Lagerungsdichte zur Folge haben. Ein Einfluss der Häcksellänge bei definierter Dichtestufe konnte (für die beiden Mais-Substrate) nicht festgestellt werden.

#### 4.2.2 Regressionsanalyse

Zur Analyse des Einflusses der Faktoren Lagerungsdichte und TS-Gehalt wurde anhand der 885 gemessenen Einzelwerte eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Die Häcksellänge blieb in der Analyse unberücksichtigt, da sich bereits gezeigt hatte, dass diese bei identischer Lagerungsdichte keinen Einfluss auf die Porosität hat.

Mit Hilfe der durchgeführten Regressionsanalyse konnte der Einfluss der Faktoren quantifiziert werden. Das lineare Modell mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von 0,98 ist unter Berücksichtigung der Faktoren TS-Gehalt und Lagerungsdichte höchst signifikant. Etwa 98 % der Varianz können durch diese Variablen erklärt werden.

**Tabelle 9: Korrelation und Bestimmtheitsmaß der linearen Regression**

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	0,990	0,979	0,979	1,6626

Die in Tab. 9 abgebildeten, nicht standardisierten B-Koeffizienten geben die Gewichtung der in unterschiedlichen Maßeinheiten vorliegenden Faktoren wieder, die in die lineare Gleichung zur Vorhersage der Porosität einzusetzen sind. Mit dieser Formel kann die Porosität jeder Maissilage näherungsweise berechnet werden, wenn TS-Gehalt und Lagerungsdichte bekannt sind. Eine veränderte Festsubstanzdichte führt jedoch zu einer abweichenden berechneten Porosität.

**Gleichung 20:**  $\text{Porosität [\%]} = 1,733 \cdot \text{TS} - \text{Gehalt [\%]} - 0,256 \cdot \text{Dichte [kg TS m}^{-3}] + 39,778$

Die in Gleichung 20 aufgeführten B-Koeffizienten beziehen sich auf unterschiedliche Einheiten, weshalb der relative Einfluss durch diese nicht gekennzeichnet werden kann. Die in Tab. 10 dargestellten Beta-Koeffizienten geben den relativen Einfluss der Faktoren Lagerungsdichte und TS-Gehalt wieder. Der Beta-Wert von 0,97 für den Einfluss der Lagerungsdichte bedeutet, dass ein nahezu umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Porosität existiert. Der Beta-Koeffizient von 0,41 für den Einfluss des TS-Gehaltes auf die Porosität bedeutet, dass sich die Porosität bei einem Anstieg des TS-Gehaltes von einer Standardabweichung um 0,41 Standardabweichungen erhöht. Das heißt, dass bei Maissilage die Porosität mit steigendem TS-Gehalt linear ansteigt.

**Tabelle 10: Koeffizienten des linearen Regressionsmodells**

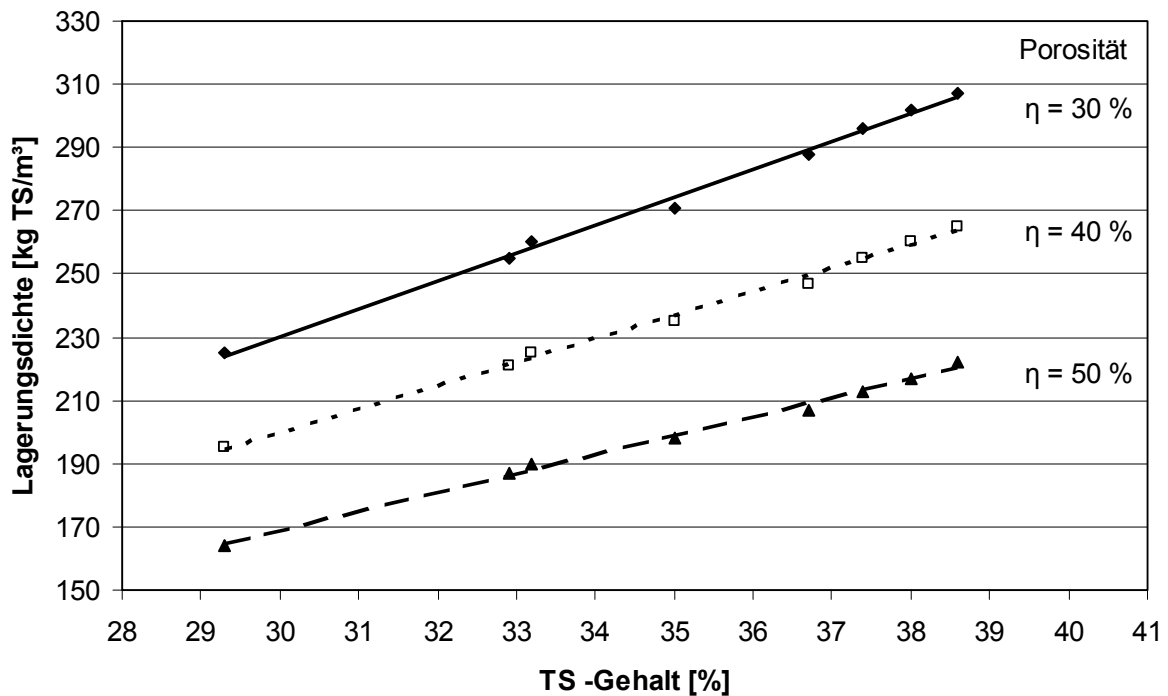
Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz
		B	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	39,778	0,741		53,701	0,000
	TS-Gehalte	1,733	0,021	0,410	83,602	0,000
	Dichte	0,256	0,001	0,9771	-199,018	0,000

#### 4.2.3 Sollwerte der Lagerungsdichte in Abhängigkeit des TS-Gehaltes bei konstanter Porosität

In Abb. 52 ist die Lagerungsdichte über dem TS-Gehalt für Linien gleicher Porosität dargestellt. Die Steigung der Geraden gibt den Anstieg der Lagerungsdichte bei zunehmendem TS-Gehalt an, der notwendig ist, um die Porosität konstant zu halten. Bei einem TS-Gehalt von 30 % und einer angestrebten Porosität von 40 % ist hierfür eine Lagerungsdichte von ca. 200 kg TS m<sup>-3</sup> erforderlich.

Nach den in den Versuchen bestimmten Porositätswerten erfordert die Konstanthaltung einer Porosität von 40 % im Trockensubstanzbereich von 29 bis 40 % eine Steigerung der TS-Dichte von 7,5 kg pro Prozent TS-Gehaltssteigerung. Die Einhaltung einer geringeren Porosität von 30 % erfordert bei TS-Gehalten um 30 % schon eine Lagerungsdichte von

230 kg TS m<sup>-3</sup>, die bei einer Steigerung des TS-Gehaltes um ca. 8,5 kg pro Prozentpunkt zu erhöhen ist. Im Bereich sehr hoher TS-Gehalte von 38 % sind somit Lagerungsdichten von etwa 300 kg TS m<sup>-3</sup> zu erzielen, um das Niveau der Porosität auf 30 % zu halten.



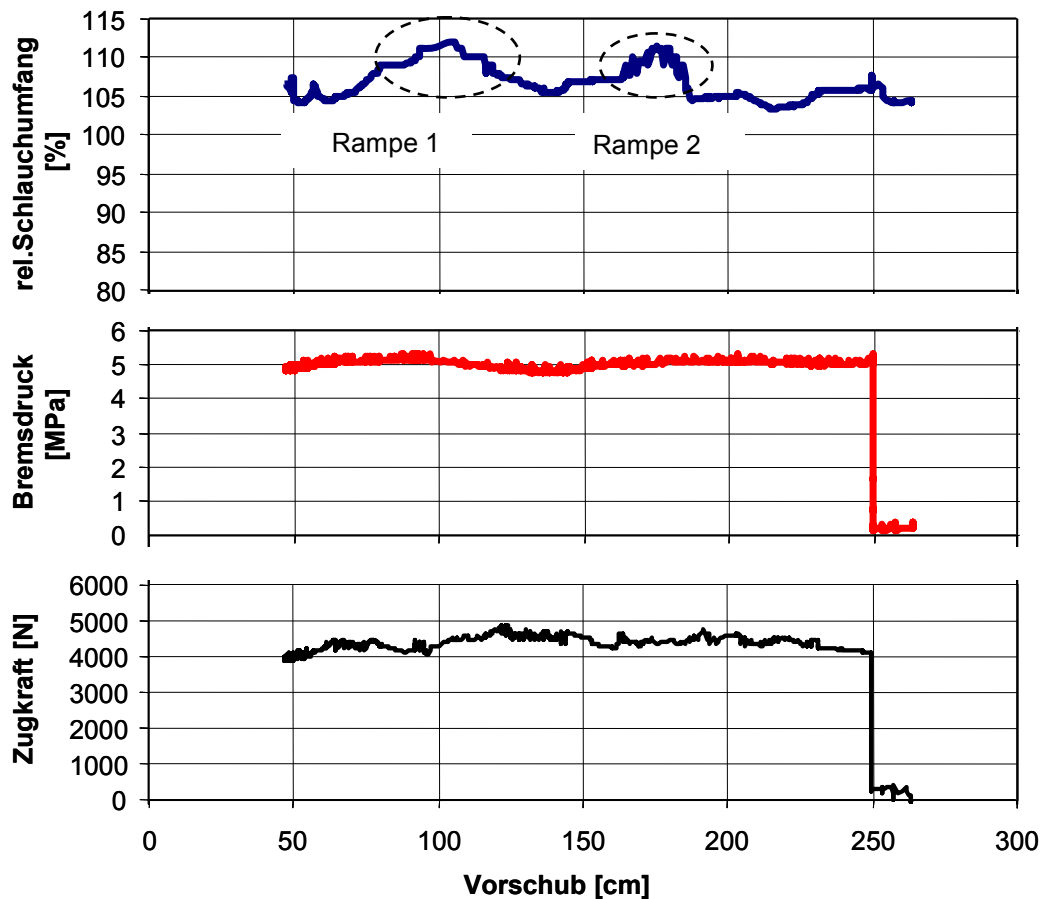
**Abbildung 52:** Verlauf der Lagerungsdichte bei zunehmendem TS-Gehalt unter Einhaltung einer konstanten Porosität für das Siliergut Mais

Die Steigung der 50 %-Porositätslinie ist mit 6 kg TS m<sup>-3</sup> Zunahme pro Prozentpunkt Trockensubstanzsteigerung am geringsten. Die dabei zu erzielenden Dichtewerte von 170 kg TS m<sup>-3</sup> bei 30 % TS bis 230 kg TS m<sup>-3</sup> bei 40 % TS liegen jedoch insgesamt gesehen weit unter den Sollwerten. Die unter Praxisbedingungen im Silo erzielten Dichtewerte befinden sich in den meisten Fällen auf dem Niveau der 40 %-Linie.

#### 4.3 Entwicklung eines Regelkreises zur Pressdrucksteuerung

Die mit der Versuchsschlauchpresse durchgeführten Vorversuche und deren Ergebnisse, die zur Modifikation der Maschine genutzt wurden, sind in der Beschreibung von Material und Methoden (Kap. 3.4) ausführlich dargestellt. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf den zuletzt verwendeten Versuchsaufbau mit elektrisch angesteuerter Bremsdruckeinstellung und sensortechnischer Erfassung der für die Regelung relevanten

Parameter. In Abb. 53 sind die Foliendehnung und der Bremsdruck sowie die Haltekraft an den Drahtseilen über die Schlauchlänge am Beispiel einer Pressung mit zwei zusätzlichen Widerständen (Rampen) ohne Bremsdruckanpassung dargestellt.



**Abbildung 53: Relativer Schlauchumfang, Bremsdruck und übertragene Bremskraft der Halteseile im Verlauf einer Versuchspressung mit zwei zusätzlichen Rampen (Pressgut Hobelspäne)**

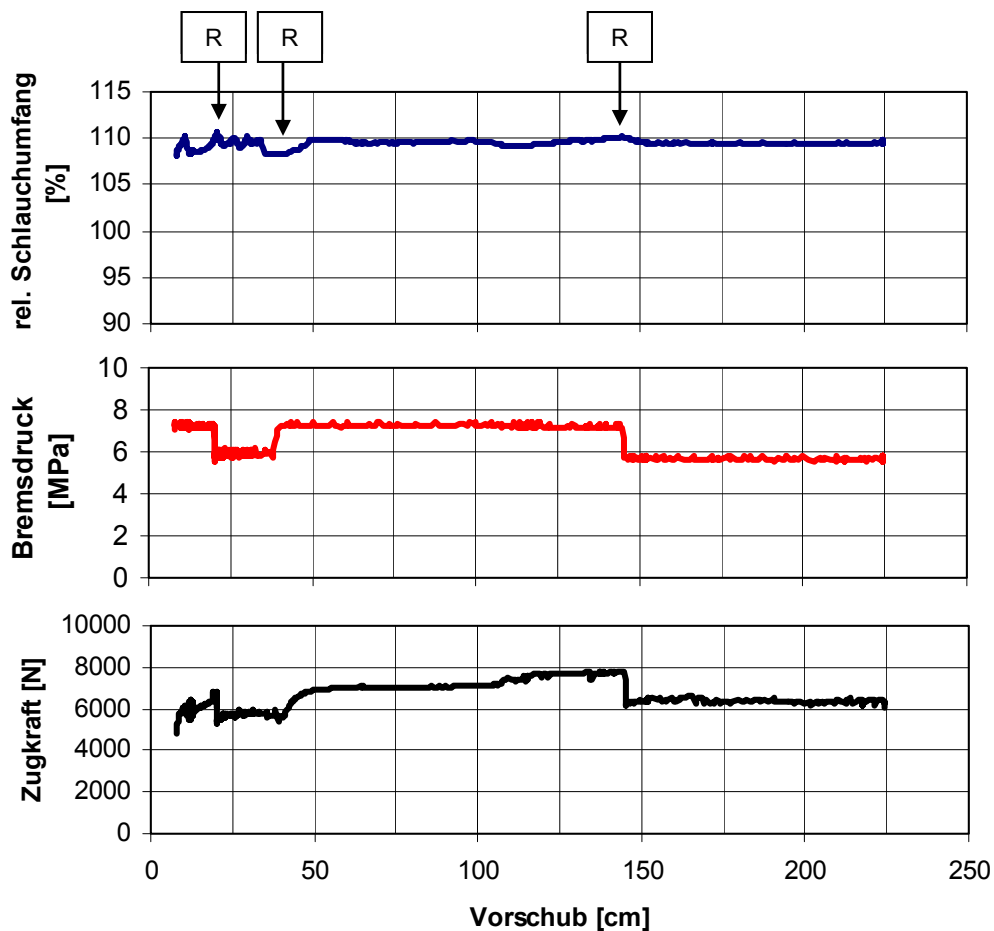
Der durch die Rampen verursachte, zusätzliche Widerstand führt im entsprechenden Schlauchabschnitt zu einer deutlich stärkeren Dehnung, welche im Diagramm (Abb. 53) durch einen gesteigerten berechneten Schlauchumfang abgebildet ist. Ein Wert von 100 % entspricht dem Umfang des ungedehnten Folienschlauchs. Die Dehnung stieg im Bereich der Rampen von 5 auf 13 % an. Aus Laboruntersuchungen des Folienherstellers ist bekannt, dass die Haltekraft der Folie im elastischen Dehnbereich bis ca. 10 % ansteigt, bei weiterer Dehnung jedoch wieder leicht abnimmt, weshalb dieser Grenzbereich nicht überschritten werden sollte. Die von den Drahtseilen übertragene Bremskraft blieb davon jedoch unbeeinflusst. Aus diesem Grund schien eine alleinige Regelung des Bremsdrucks

unter Verwendung der Haltekraft nicht geeignet, um von außen beeinflusste Widerstandsänderungen, wie z.B. Bodenunebenheiten, zu kompensieren. Änderungen der Pressguteigenschaften können ebenfalls das Pressverhalten des Gutes beeinflussen und bei gleicher Bremskraft eine zu- oder abnehmende Schlauchdehnung verursachen.

Über die Messung des Schlauches in Höhe und Breite kann der Schlauchumfang und damit die Schlauchdehnung als Gesamteffekt der verschiedenen Einflussgrößen ermittelt werden. Für die weiteren Pressversuche wurde deshalb der relative Schlauchumfang als Parameter für die Regelung des Bremsdruckes gewählt.

In Abb. 54 sind der Verlauf des relativen Schlauchumfangs, des anliegenden Bremsdruckes sowie die Zugkraft der Halteseile für eine Pressung ohne Zusatzwiderstand mit einer automatischen Bremsdruckanpassung dargestellt. Die Grenzwerte für die Regelung wurden bei 108,5 % als unterer und 110 % als oberer Wert des relativen Schlauchumfangs festgelegt. Um eine zu starke Bremsdruckkorrektur zu vermeiden, wurde der maximale Regelbetrag auf 2 MPa pro Eingriff begrenzt. Eine erneute Korrektur wurde erst nach einem Intervall von 30 Sekunden zugelassen. In diesem Zeitraum kann der gemessene Schlauchumfang wieder in den Sollbereich gelangen, sodass kein weiterer Regeleingriff erforderlich ist. Liegt der Schlauchumfang noch immer außerhalb der Sollwerte, wird erneut geregelt. Die Regelereignisse sind in der Abbildung im Verlauf des relativen Schlauchumfangs gekennzeichnet und auch im Druckverlauf deutlich zu erkennen. Ab einem Vorschub von ca. 110 cm nimmt die an den Seilen gemessene Bremskraft zu, obwohl keine Anhebung des Bremsdruckes erfolgte. Der Grund dafür könnte in einem ansteigenden Reibwert der Bremse liegen. Andere Veränderungen konnten nicht festgestellt werden. Der resultierende Anstieg des Schlauchumfangs wurde durch eine Absenkung des Bremsdrucks ausgeglichen. Für die Pressung des relativ homogenen Pressgutes Silomais ohne Zusatzwiderstand hat sich dieses Verfahren der Bremsdruckregelung als geeignet erwiesen.

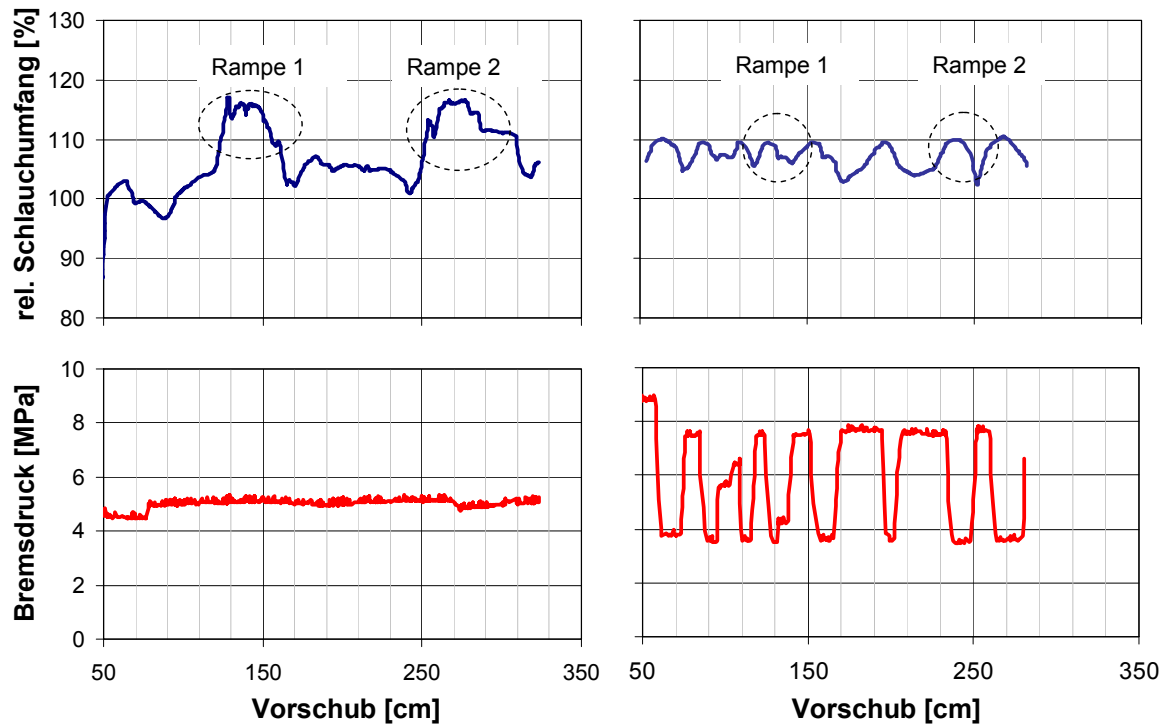
Bei Verwendung der Rampen als Zusatzhindernis war dieses Regelverfahren jedoch nicht geeignet, da die Absenkung des Bremsdruckes beim Auflaufen des Presswagens auf die Rampen mit zu großer Verzögerung erfolgte. Die Schlauchdehnung stieg in kurzer Zeit weit über die Sollwerte. Nach Überwindung der Rampen wurde die Bremse zu spät wieder angezogen, wodurch der Presswagen unter geringer Schlauchfüllung vorschob.



**Abbildung 54: Versuchspressung ohne Zusatzwiderstand mit automatischer Bremsdruckanpassung von maximal 2 MPa pro Regelschritt (Mais)**

Um auf die durch die Rampen stark geänderten äußeren Widerstände schneller zu reagieren, wurde der Bremsdruck auf andere Weise geregelt. Es wurden Maximal- und Minimaldrücke festgelegt, zwischen denen ohne Verzögerung je nach Istwert des Schlauchumfangs geregelt wurde. Dies führt dazu, dass der Druck von der Regelung entweder auf den oberen oder auf den unteren Grenzwert gefahren wird und dadurch der Presswagen bei geringem Druck vorschiebt bzw. bei hohem Druckwert gestoppt wird.

In Abb. 55 (rechts) ist der Verlauf von Foliendehnung und Bremsdruck über die Schlauchlänge bei einer Regelung nach dieser „Stopp-and-Go Variante“ im Vergleich zu einer Pressung ohne Bremsdruckanpassung von Silomais dargestellt, wobei nach Pressbeginn der Druckverstellbereich auf 3,5 bis 7,5 MPa begrenzt wurde.



**Abbildung 55: Foliendehnung und Bremsdruck über der Schlauchlänge bei Pressung ohne Bremsdruckanpassung (links) und mit automatischer Bremsdruckanpassung (rechts)**

Beim Auflaufen des Wagens auf die Hindernisse erfolgt zunächst ein Anstieg der Foliendehnung mit darauf folgender Bremsdruckabsenkung. Nach Überwindung des Hindernisses sinkt die Foliendehnung zunächst ab, woraufhin der Bremsdruck wieder erhöht wird. Auf diese Weise können von der Bremse unabhängige Widerstandsänderungen durch eine Druckanpassung ausgeglichen und extreme Schlauchdehnungen vermieden werden. Durch den relativ schnellen Vorschub während der Phase niedrigen Bremsdruckes und der dabei abnehmenden Schlauchdehnung sinkt diese kurzzeitig unter die Sollwerte, da die Bremsdruckanhebung erst mit einer kurzen Verzögerung nach Unterschreiten des Sollwertes erfolgt. Allerdings werden nach dem Stoppen der Vorwärtsbewegung durch die Bremsdrucksteigerung bereits hinter der Sensorebene befindliche Schlauchabschnitte mit niedriger Schlauchdehnung auf Höhe der Sensorebene durch nachdrückendes Pressgut weiter aufgefüllt. Dadurch ist die letztendliche Schlauchdehnung größer als die für diesen Schlauchabschnitt am Sensor gemessene. Dieser Effekt wird bei einem Vergleich des in Abb. 55 (rechts oben) dargestellten Dehnungsverlaufes mit dem in Abbildung 56 (rechts) fotografierten, fertigen Versuchsschlauch deutlich.



**Abbildung 56: Versuchsschlauch mit Rampen ohne Pressdruckanpassung (links) und mit automatischer Pressdruckanpassung (rechts)**

Der ohne Bremsdruckanpassung gefüllte Versuchsschlauch (Abb. 56 links) spiegelt hingegen an seiner Schlauchkontur den in Abb. 55 (links) dargestellten Dehnungsverlauf wider. Eine Positionierung der Sensoren in größerem Abstand zum Presstunnelende, in welchem die Schlauchfüllung komplett abgeschlossen ist, würde zu einer Messung der endgültigen Schlauchgröße führen. Sie hätte jedoch den großen Nachteil, dass eine Bremsdruckanpassung nur mit größerer Verzögerung durchgeführt werden könnte, da direkt hinter dem Presstunnelende auftretende Größenänderungen erst mit zeitlichem Verzug erfasst würden.

#### **4.4 Einfluss der Siliergutverdichtung auf die Partikelstruktur**

Der Einfluss des Verdichtungsprozesses mittels Pressrotor auf die Partikelstruktur wurde am Beispiel des Siliergutes Mais mit Hilfe einer Siebanalyse untersucht. Generell wurde festgestellt, dass die Verarbeitung des Siliergutes zu einer Veränderung der Partikelgrößenzusammensetzung führt. In Abb. 57 ist der Anteil der verschiedenen Partikelgrößenzusammensetzungen für das nicht gepresste sowie für das mittels Schlauchpresse verdichtete Siliergut kumuliert dargestellt. In den Größenfraktionen  $> 3$  mm waren keine signifikanten Veränderungen der Massenanteile festzustellen, wohingegen in den Größenklassen 3 bis 6 mm und 6 bis 10 mm bei gepresstem Häckselgut um jeweils 5 % höhere Massenanteile vorhanden waren. Der Anteil von Überlängen  $> 15$  mm ist bei gepresstem Häckselgut wesentlich kleiner als beim unbehandelten Originalgut. Insgesamt wurde beobachtet, dass die Verarbeitung des Siliergutes durch den Pressrotor zu einer Verschiebung von Massenanteilen der Größenklassen  $> 10$  mm in die von 3 bis 10 mm führte. Der Anteil der sehr kleinen Partikel, die bei einer im Vorfeld des Versuches befürchteten Vermusung des Gutes stark zunehmen würden, blieb hingegen nahezu unverändert.



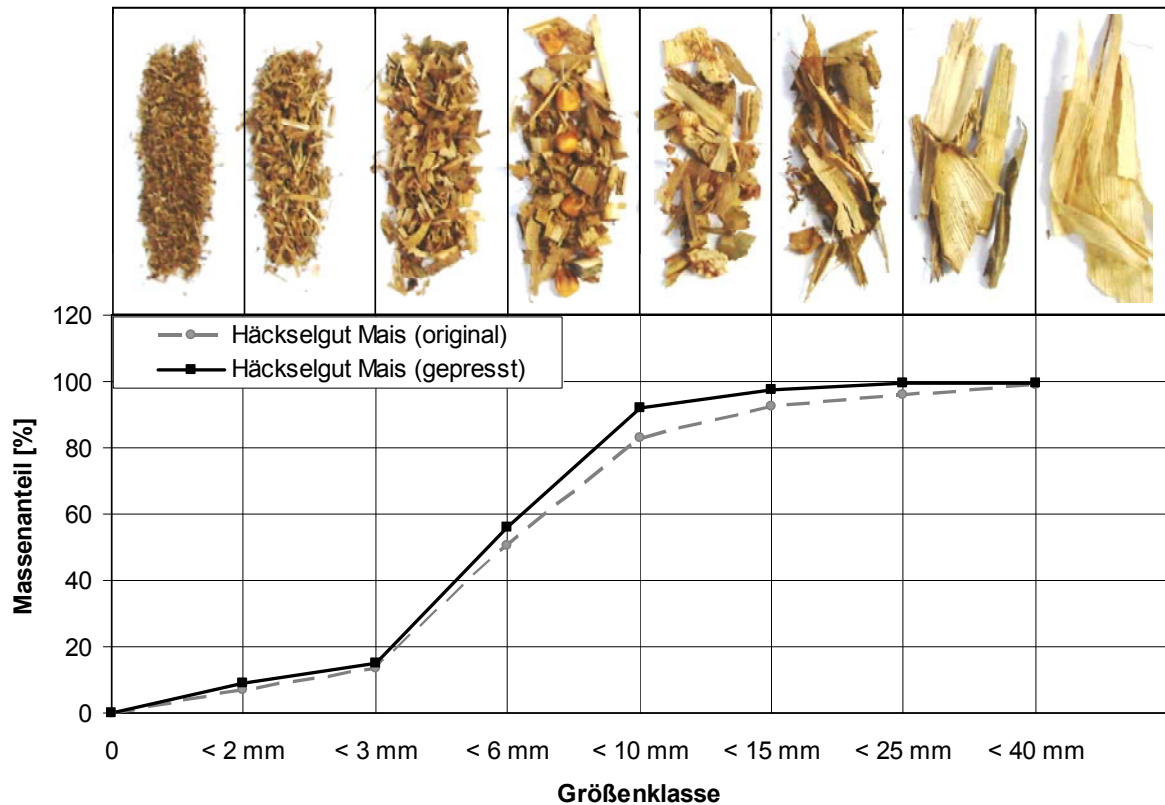
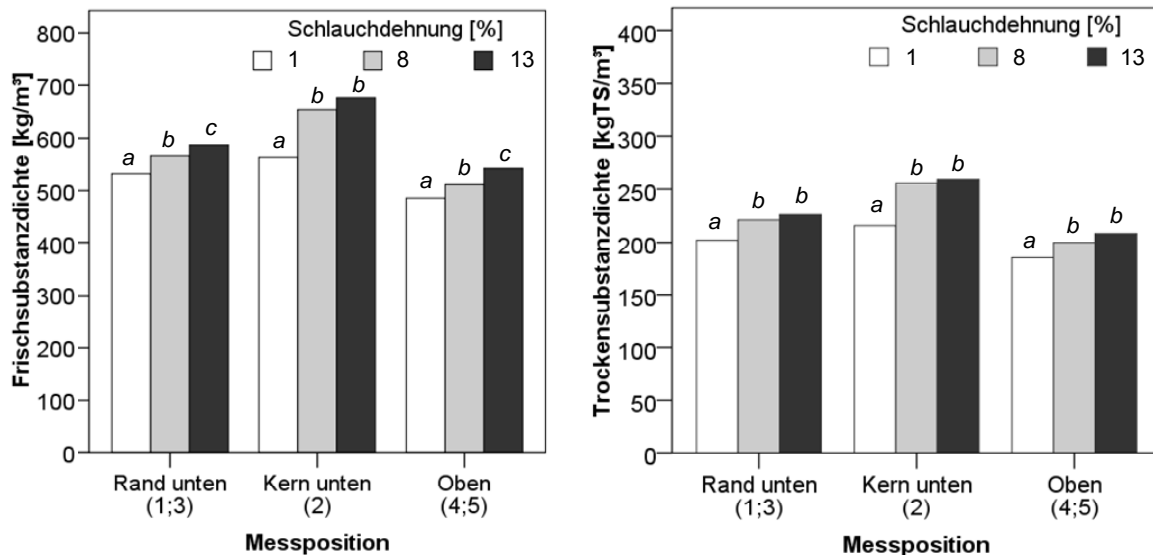


Abbildung 57: Vergleich der Massenanteile in den Größenklassen von originalem Häckselgut und gepresstem Häckselgut (Mais 38 % TS, n = 10)

#### 4.4.1 Verteilung der Lagerungsdichte im Versuchsschlauch

Bei der Untersuchung der Lagerungsdichte im Versuchsschlauch galt es zum einen den Einfluss der Pressintensität, als deren Maß die Schlauchdehnung herangezogen wurde, und zum anderen die Änderung der Presswirkung über den Schlauchquerschnitt zu analysieren. Die Ergebnisse der mit dem Probenbohrer entnommenen Kerne zur Untersuchung der Lagerungsdichte sind in Abb. 58 dargestellt. Die Lagerungsdichten in den Versuchsschläuchen lagen mit 470 bis 670 kg m<sup>-3</sup> Frischsubstanz bzw. 190 bis 260 kg m<sup>-3</sup> Trockensubstanz auf gleichem Niveau wie in den untersuchten Praxissilos. Der TS-Gehalt war mit 38 % vergleichsweise hoch. Der Versuchsschlauch mit nur 1 % Schlauchdehnung wies an allen Beprobungspositionen signifikant niedrigere Dichtewerte auf. Am unteren Rand und an den oberen Messpositionen wurden auch zwischen der 8 %-Dehnung und der 13 %-Variante bedeutsame Unterschiede der Frischsubstanzdichte festgestellt, während die geringeren Differenzen im Kern nicht statistisch abzusichern waren. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass für den Kernbereich nur eine Messposition zur Verfügung stand und

deshalb die Probenanzahl nur halb so groß ist wie die der anderen Positionen. Die Unterschiede in der Trockensubstanzdichte zwischen der 8 %-Dehnung und der 13 %-Variante sind an keiner der Messpositionen signifikant.



\* Signifikante Unterschiede zwischen den Dehnstufen der jeweiligen Messposition sind mit *abc* gekennzeichnet ( $\alpha = 0,05$ )

**Abbildung 58: Frisch- und Trockensubstanzdichte der Versuchsschläuche mit zunehmender Schlauchdehnung aufgeteilt nach Messpositionen (Mais n = 3).**

Der relative Dichteunterschied war insgesamt im Schlauchkern mit ca. 20 % von der unteren zur oberen Dehnstufe am größten. Eine Steigerung der Dehnung von 8 auf 13 % bewirkte mit ca. 2 Prozentpunkten jedoch nur noch geringe zusätzliche Dichtesteigerungen. Am unteren Rand und an den oberen Messpunkten waren die von der Schlauchdehnung abhängigen Unterschiede insgesamt geringer, wobei im Vergleich zum Kern ein deutlich kleinerer Anstieg von der 1 % zur 8 %-Variante festzustellen war.

Die Dichtedifferenzen über den Schlauchquerschnitt waren bei der 1 % Variante mit nur 12 % vom Kern zum oberen Rand deutlich geringer als bei den Versuchsschläuchen mit 8 und 13 % Schlauchdehnung, bei denen 18 bis 22 % Dichteunterschied festgestellt wurden. Die Schlauchfüllung bei einem höheren Pressdruck führte offenbar im Kern zu einer größeren Steigerung der Presswirkung als an den vom Pressrotor weiter entfernten Messpositionen. Eine weitere Drucksteigerung (13 % Dehnung) führte jedoch im Kern zu nur geringem Dichteanstieg, der im gleichen Maß auch an den Randpositionen festzustellen war.

Bei der Betrachtung der messpositionsbezogenen Dichteunterschiede ist allerdings zu beachten, dass sich die gewählte Schlauchdehnung auf die Ablageform und das Verhältnis von Höhe zu Breite auswirken (Abb. 42). Die Varianten mit 8 bzw. 13 % Dehnung sind im Scheitelpunkt wesentlich höher als die 1 %-Variante, weshalb im Kern eine stärkere Selbstverdichtung der Silage anzunehmen ist, die zum Teil die größere Dichtesteigerung begründet.

Die parallel zur Beprobung der Schläuche durchgeführte Bestimmung der Dichte des jeweiligen Schlauchabschnittes durch Volumenvermessung und Siliergutverwiegung bestätigte insgesamt die Werte der Bohrstockbeprobung. Die bestimmten Durchschnittsdichten unterschieden sich nur sehr gering vom jeweiligen arithmetischen Mittel der fünf Beprobungspositionen.

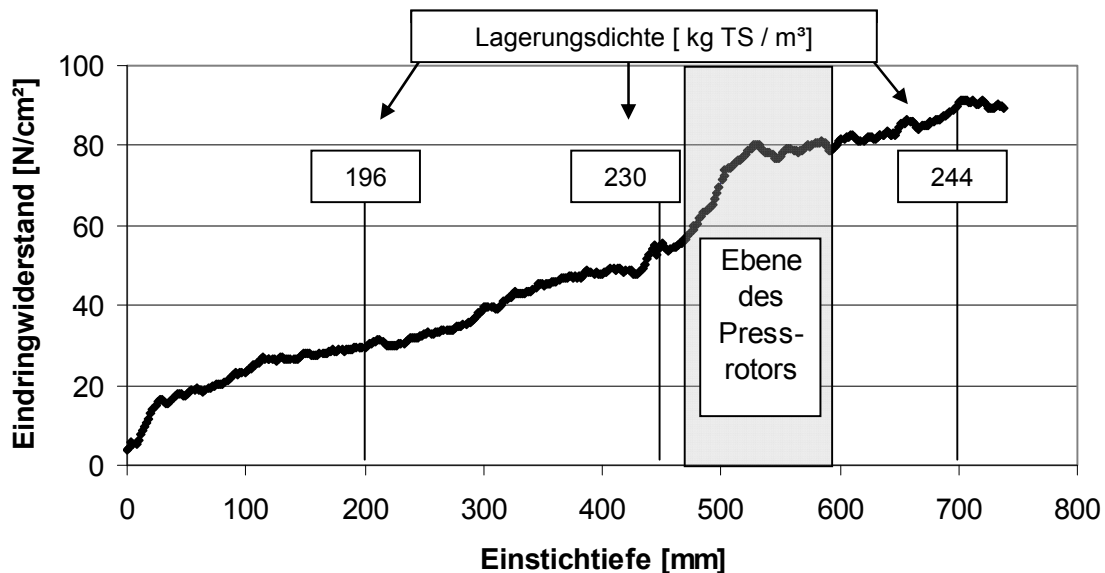
**Tabelle 11: Durchschnittliche Lagerungsdichte über den Schlauchquerschnitt in den Versuchsschläuchen der drei Dehnungsstufen**

<b>Relative Schlauchdehnung</b>	<b>FS-Dichte [kg m<sup>-3</sup>] Schlauchabschnitt (n=3)</b>	<b>FS-Dichte [kg m<sup>-3</sup>] Ø 5 Bohrproben (n=3)</b>	<b>TS-Dichte [kg TS m<sup>-3</sup>] Schlauchabschnitt (n=3)</b>	<b>TS-Dichte [kg TS m<sup>-3</sup>] Ø 5 Bohrproben (n=3)</b>
<b>1 %</b>	523	516	200	197
<b>S</b>	12,6	14,7	4,9	5,6
<b>8 %</b>	574	563	224	220
<b>S</b>	16,1	13,5	6,2	5,3
<b>13 %</b>	592	583	228	225
<b>S</b>	14,5	11,2	5,6	4,3

#### **4.4.2 Eindringwiderstand als Maß der Siliergutdichte**

Zur differenzierteren Betrachtung der Siliergutdichte über den Schlauchquerschnitt wurde neben der Dichte der Eindringwiderstand im vertikalen Verlauf des Schlauches gemessen. Der aus zehn Einstichen gemittelte Kraftverlauf über den Eindringweg ist in Abb. 59 dargestellt. Der Widerstand nahm mit zunehmender Einstichtiefe zu, wobei in einer Höhe von ca. 40 cm über dem Schlauchboden ein sprunghafter Anstieg um ca. 30 % zu verzeichnen

war. Im unteren Schlauchdrittel stieg die Eindringkraft jedoch nur geringfügig an. Die unteren 10 bis 15 cm des Schlauches konnten aufgrund der begrenzten Länge der Penetrometerlanze nicht beprobt werden.



**Abbildung 59:** Eindringswiderstand im Verlauf vertikaler Einstiche von oben in die Versuchsschläuche (Mais  $n = 10$ ) und Lagerungsdichte in drei Höhen auf dem Einstichweg ( $n = 4$ )

Die drei übereinander liegenden Dichtemesspunkte im Eindringverlauf zeigen eine nach unten hin zunehmende Lagerungsdichte, wobei zu berücksichtigen ist, dass vor allem bei der in Abb. 59 bei 45 cm eingezeichneten, mittleren Messposition auch die umliegenden Höhenbereiche mit erfasst werden, da die Bohrkronen einen Durchmesser von 102 mm hat. Der stärker verdichtete Kernbereich fließt so zum Teil in die Werte der mittleren Messposition mit ein. Die Differenz der Lagerungsdichte vom unteren Kernbereich bis zur oberen Mitte beträgt ca. 20 %, wohingegen der Eindringswiderstand im Bereich der oberen Messposition um 65 % geringer ist als auf Höhe der unteren.

Die Ebene, in der sich der sprunghafte Anstieg des Eindringswiderstandes abzeichnet, liegt auf Höhe des horizontal im Presstunnel positionierten Rotors, durch den in diesem Bereich eine unmittelbare Verdichtungswirkung auf das Siliergut ausgeübt wird. Der Bereich unter der Rotorebene wird zusätzlich durch die aufliegende Siliergutmasse verdichtet, sodass trotz der nicht direkt wirkenden Verdichtungskraft relativ hohe Lagerungsdichten erzielt werden.

## **5 Diskussion**

### **5.1 Bewertung der Methode zur Dichtebestimmung**

Für die Bestimmung der Lagerungsdichte in den Schlauchsilagen der verschiedenen Siliergüter wurde der unter Kap. 3.1 beschriebene, elektrisch angetriebene Bohrstock eingesetzt. Um den Messfehler gegenüber den alternativ zur Verfügung stehenden Probenehmern zu minimieren, wurde ein größerer Durchmesser und eine nach innen stärker abgesetzte Schneidklinge verwendet. Durch diese Maßnahmen konnte der Fehler bei der Probenahme verringert werden. Die dabei zu erzielende Messgenauigkeit ist jedoch auch bei diesem Probennehmer von den Silierguteigenschaften und der zur Verfügung stehenden Anschnittfläche abhängig. Bei Siliergütern relativ fester und gleichmäßiger Struktur sowie kurzer Partikellänge, wie diese bei Pressschnitzeln, Siliomais und Lieschkolbenschrot vorzufinden sind, kann von einer guten Messgenauigkeit ( $< 5\%$  Abweichung) ausgegangen werden. Dies wurde bei Referenzmessungen nach der Massen- und Volumenbestimmung mit einem Siloblockschneider bestätigt. Bei Probenbohrern kleineren Durchmessers (z.B. Pioneer Probenbohrer) ist bei Lagerungsdichten  $< 200 \text{ kg TS m}^{-3}$  von einer erheblichen Unterschätzung der Dichte auszugehen (Abb. 18 oben). Dieser Messfehler kann durch eine Korrektur der Werte zum Teil ausgeglichen werden (KLEINMANS et. al., 2005). Die große Spannweite der bei ähnlicher Lagerungsdichte gemessenen Werte zeigt jedoch, dass der Effekt der Unterschätzung nur bedingt pauschal zu korrigieren ist. Daher ist insgesamt von einem größeren Messfehler als bei großvolumigeren Bohrstöcken auszugehen.

Während der Beprobung der Schlauchsilagen hat sich die Bohrkernentnahme in langfaserigem Gut (Gras und Luzerne) als wesentlich schwieriger dargestellt. Hier wurden vor allem bei nicht optimal verdichtetem Gut mit höherem TS-Gehalt ( $> 35\%$ ) Fasern an der Schneidkrone mitgedreht sowie nicht sofort abgetrennt und aufgenommen. Außerdem war der Vortrieb durch die Wendel auf der Bohrstockaußenseite stark eingeschränkt, da das umliegende Siliergut nicht genügend Widerstand bot. Bei der Entnahme des Bohrstockes riss zum Teil Siliergut innerhalb der Bohrkrone aus und verblieb im Silo. Die Messgenauigkeit ist durch die beschriebenen Problematiken geringer als bei den zuvor diskutierten Siliergütern. Das Mitdrehen von Siliergut an der Schneidkrone konnte durch ein flacheres Anschleifen der gezahnten Klinge verringert werden. Bei Siliergut sehr geringer Dichte ist eine gewisse Verdrängung von Siliergut nach außen kaum zu vermeiden, die zu einer Unterschätzung der schon geringen realen Dichtewerte führen. Von wenigen

Ausnahmen abgesehen, hat sich der selbst entwickelte Probennehmer für die Entnahme der Bohrkern zur Dichtebestimmung als gut geeignet erwiesen.

Gegenüber den dargestellten Fehlern der Probenahme sind die der Verwiegung und Trocknung der Proben als gering einzustufen.

## **5.2 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf die Verdichtung**

Die in den Siliergütern gemessenen durchschnittlichen Lagerungsdichten lagen auf ähnlichem Niveau wie es in früheren Untersuchungen bei der Beprobung von Fahrsiloanlagen festgestellt wurde. Dies wird beim Vergleich der Dichtewerte aus Abb. 44 mit denen aus den Untersuchungen von THAYSEN (2008a) und SPIEKERS (2004) deutlich. Anzumerken ist hierbei, dass die Lagerungsdichte im Fahrsilo an Positionen mit ähnlicher Überlagerungshöhe zu vergleichen ist. So ist bei großen Fahrsiloanlagen mit sehr hohen Futterstöcken im mittleren und unteren Teil der Anschnittfläche, bedingt durch die Autokompression, eine wesentlich höhere Dichte vorzufinden. Hingegen werden im Bereich nahe der Silooberkante häufig niedrige Lagerungsdichten ( $< 180 \text{ kg TS m}^{-3}$ ) festgestellt (SPIEKERS, 2004).

Innerhalb einer Silageart war bei den untersuchten Schlauchsilos tendenziell eine steigende Trockensubstanzdichte bei zunehmendem TS-Gehalt der Siliergüter festzustellen (Abb. 44, Tab. 7). Die trockenstoffbezogene Dichtezunahme unterschied sich jedoch bei den einzelnen Siliergütern, wobei grundsätzlich zu beachten ist, dass neben der Variation des TS-Gehaltes auch andere Güteeigenschaften sowie der Einsatz der Presstechnik erheblichen Einfluss auf die jeweilige Lagerungsdichte nahmen. Für die Siliergüter Gras, Luzerne und Silomais ist die gemessene Steigerung der Lagerungsdichte bei zunehmenden TS-Gehalten nicht ausreichend (Tab. 7), um die Porosität in der Silage auf niedrigem (z.B. 40 %) Niveau zu halten. Deshalb ist auch bei der Silierung im Folienschlauch ein erhöhtes Risiko der Nacherwärmung bei relativ trockenen Siliergütern ( $> 35 \text{ % TS-Gehalt}$ ) einzukalkulieren. Die Problematik der Verdichtung von Siliergütern höheren TS-Gehaltes ist deswegen im Folienschlauch ähnlich vorhanden wie diese auch von WAGNER (2005) bei der Silierung im Flachsilo beschrieben wird.

### 5.3 Lagerungsdichte über die Querschnittsfläche

Mit Hilfe der Beprobung an zehn über die Schlauchanschnittfläche verteilten Positionen wurde die Siliergutverdichtung über den Schlauchquerschnitt analysiert. Im Bereich des oberen Randes und den Flanken der Schläuche wurden 25 bis 35 % niedrigere Lagerungsdichten als im Kern gemessen. MUCK und HOLMES (2002) stellten in ihren Untersuchungen an Gras im oberen Schlauchabschnitt Dichten von nur 40 % von den im Kern gemessenen Werten fest. Eine solch extreme Abnahme der Lagerungsdichte zum oberen Rand wurde bei keiner der untersuchten Silagen festgestellt und kann somit nicht bestätigt werden. Die relativ zur Kernzone gemessenen Lagerungsdichten sind in Abb. 60 dargestellt.

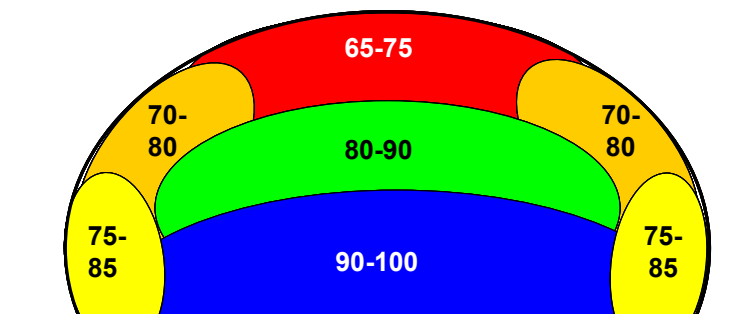
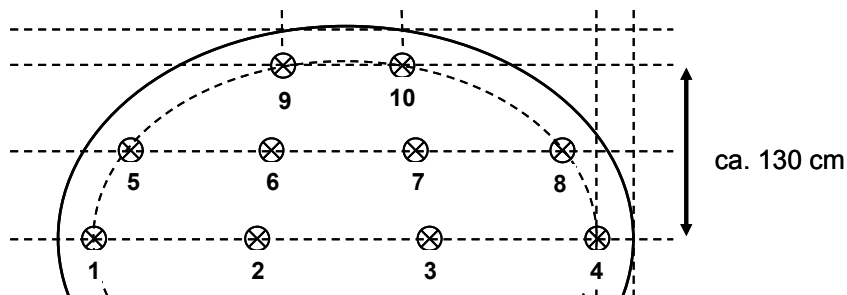


Abbildung 60: Lagerungsdichte über den Schlauchquerschnitt (Angabe in % relativ zur Kernzone)

Am unteren seitlichen Rand (Messposition 1; 4) und an den Schlauchflanken (5; 8) wurden im Vergleich zum Kern um 20 bis 30 % geringere Dichten ermittelt. Besonders an den Messpositionen 1 und 4 wurden Werte in einer großen Spannbreite gemessen. Bei Schläuchen von hoher und schmaler Kontur waren die unteren Ränder besser verdichtet als bei solchen, die eine breite und flache Form aufwiesen. Die Schläuche, die mit größerem Presstunnel (305 cm statt 274 cm Schlauchdurchmesser) gepresst wurden, wiesen im Randbereich tendenziell geringere Lagerungsdichten auf, wohingegen die Schläuche kleineren Durchmessers (244 cm) im Rand- und Flankenbereich besser verdichtet waren. Die eingesetzte Schlauchpresse war jeweils eine Maschine vom Typ G 7000. Daraus ist abzuleiten, dass die Siliergutverdichtung vor allem im Randbereich besser ist, wenn die sich ergebende Schlauchbreite nur wenig größer ist als die Rotorbreite, sodass eine direkte Gutverdichtung in Flussrichtung erfolgen kann.

Die Abnahme der Lagerungsdichte zu den Flanken und zum oberen Rand ist teilweise durch die geringere Autokompression in Folge der abnehmenden Überlagerungshöhe begründet. Ob die sich ergebenden Dichteunterschiede hauptsächlich dadurch bedingt sind oder der Haupteinfluss von der Art der Presstechnik ausgeht, kann durch Korrektur der Dichtewerte nach der Überlagerungshöhe zum Teil beantwortet werden. Nach der von PITT (1983) entwickelten Gleichung 2 (Kap. 2.2.3) steigt die Lagerungsdichte in Abhängigkeit der Überlagerungshöhe um 20 bis 30 kg TS/m zusätzliche Siliergutaufgabe. Bei relativ feuchten Siliergütern mit hoher Schüttdichte ist der Effekt größer als bei trockenen Siliergütern mit geringerer Schüttdichte und hohen Rückstellkräften (WILLIAMS, 1994). Werden die Verhältnisse auf die am Siloschlauch vorliegende Geometrie übertragen, so ergibt sich, dass bei einer Differenz der Überlagerungshöhe von 1,30 m (Abb. 61) von den Messpositionen im Kern (2; 3) zu den oberen Messpositionen (9; 10) ein Dichteunterschied von 25 bis 40 kg TS m<sup>-3</sup> durch die Autokompression verursacht wird.



**Abbildung 61: Differenz der Überlagerungshöhe am Siloschlauch zwischen den oberen und unteren Messpositionen**

Die an den Schlauchsilagen gemessenen Dichtewerte ergaben für die angegebenen Messpositionen eine Differenz von ca. 60 kg TS m<sup>-3</sup> bei Silomais und Gras sowie ca. 70 kg TS m<sup>-3</sup> im Fall von Pressschnittsilage und Luzerne. Bei einem durch die Autokompression bedingten Dichteunterschied von 25 bis 40 kg TS m<sup>-3</sup> kann davon ausgegangen werden, dass der übrige Teil der Differenz auf die Verdichtungswirkung der eingesetzten Presstechnik zurückzuführen ist. Dies würde bedeuten, dass die durch die Pressrotortechnik von oben ansteigende Verdichtungsintensität mit einem Dichteunterschied von 25 bis 35 kg TS m<sup>-3</sup> zu ca. 50 % zu der nach unten hin ansteigenden Lagerungsdichte beiträgt. Die andere Hälfte wird durch den Effekt der Autokompression verursacht.



#### 5.4 Messung der Porosität in Silage

Zwischen Lagerungsdichte und Porosität und folglich auch der Permeabilität besteht nach PARSONS et al. (1988) und PITT (1983) ein negativ linearer Zusammenhang. Die Permeabilität einer Silage beeinflusst maßgeblich Gasabfluss und Lufteindringung an der Anschnittfläche (WILLIAMS, 1994). Der TS-Gehalt hat durch die von Wasser abweichende Festsubstanzdichte der Silagetrockensubstanz bei konstanter Lagerungsdichte einen Einfluss auf die Porosität und damit auch auf die Permeabilität (MC RANDAL und MC NULTY, 1980). Ein variierender Anteil der Festsubstanz verschiebt die Dichte der Gesamtfraktion von Wasser plus Festsubstanz, da die Festsubstanzdichte (1400 bis 1450 kg m<sup>-3</sup>) um den Faktor 1,4 bis 1,45 größer ist als die von Wasser. Ein Verfahren zur direkten Bestimmung der Porosität von Silage ermöglicht somit auch eine Aussage über die Permeabilität, ohne dass TS-Gehalt und Festsubstanzdichte bekannt sein müssen. Sind die Werte dieser Kenngrößen vorhanden, kann die Porosität auch anhand der Lagerungsdichte berechnet werden (HONIG, 1987).

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Landtechnik (ROß, 2008) war es Ziel, eine genaue Messmethode zur experimentellen Bestimmung der Porosität von Siliergütern zu entwickeln (Kap. 3.2). Dabei wurde als Messprinzip die von REES et al. (1983) eingesetzte Methode weiterentwickelt, die auf einer Differenzdruckmessung während eines Druckausgleiches basiert (Kap. 2.6). Der Unterschied zur Methode von REES et al. besteht in der Bereitstellung der für die Porositätsmessung eingesetzten Probe. Während diese in sich unzerstörte Bohrkerne mit einem speziellen Probenbohrer aus einem Silostock entnommen und sie zusammen mit einem eng angepassten Probezylinder in den Druckbehälter eingesetzt hatten, wird das Probegut bei der weiterentwickelten Methode unmittelbar vor der Messung auf eine einzustellende Lagerungsdichte komprimiert. Aus Sicht der Messgenauigkeit bietet dies den Vorteil, dass der Probenraum durch die Querschnittsfläche des Messzylinders und den sehr exakt in der Höhe einfahrbaren Kolben präzise erfassbar ist. Bei der von REES et al. (1983) angewandten Gewinnung der Proben können hingegen Veränderungen an den Schnittstellen, die durch die Entnahme verursacht werden, zu Abweichungen des tatsächlichen Probenvolumens führen. Außerdem entfällt der Aufwand für die Gewinnung von intakten Bohrkernen. Bei Siliergütern kleiner Partikelstruktur, wie Silomais oder LKS, ist die Entnahme intakter Bohrkern durch den geringen Zusammenhalt des Probegutes erschwert.

Die Verdichtung des Gutes im Proberaum selbst hat jedoch in Bezug auf den maximal möglichen Überdruck einen Nachteil gegenüber dem von REES et al. eingesetzten Aufbau. Die Dichtung zwischen Kolben und Zylinderwandung ist nicht so druckstabil wie ein mit Dichtung verschraubter Stahlzylinder. Außerdem ist der verwendete Plexiglaszylinder nur für Drücke bis zu 0,2 MPa geeignet. Eine Erhöhung des Gasaustausches bei Druckausgleich durch eine größere Druckdifferenz würde jedoch die Messgenauigkeit der Versuchsmethode erhöhen. Die Verwendung eines elektronischen Druckmessers mit hoher Auflösung und Messgenauigkeit gleicht diesen Nachteil jedoch zum Teil wieder aus, da der bei der Differenzdruckmessung auftretende Fehler kleiner ist als bei dem von REES et al. eingesetzten Druckmanometer.

Eine mögliche Verbesserung des Versuchsaufbaus könnte durch Ersetzen des Plexiglaszylinders gegen einen Stahlzylinder sowie durch Einsatz einer standfesteren Abdichtung erreicht werden.

Ein Vergleich der gemessenen Porositätswerte mit denen von HÄBLER et al. (2008) (Kap. 2.6) zeigt, dass die Werte auf ähnlichem Niveau liegen. HÄBLER et al. trugen die Porositätswerte jedoch gegenüber der Frischsubstanzdichte auf und stellten dabei einen linearen Zusammenhang fest. Ein direkter Vergleich der Messwerte ist jedoch nicht möglich, da bei den von HÄBLER et al. angegebenen Porositätswerten keine Angabe über den TS-Gehalt der jeweiligen Probe vorhanden ist.

Die aus den Versuchen mit Maissilage verschiedenen TS-Gehaltes ermittelten Isolinien für Porositäten von 30, 40 und 50 % können mit denen unter Verwendung einer durchschnittlichen Festsubstanzdichte berechneten Isoporositätslinien verglichen werden (Abb. 62). Die Berechnung erfolgt nach folgenden Gleichungen:

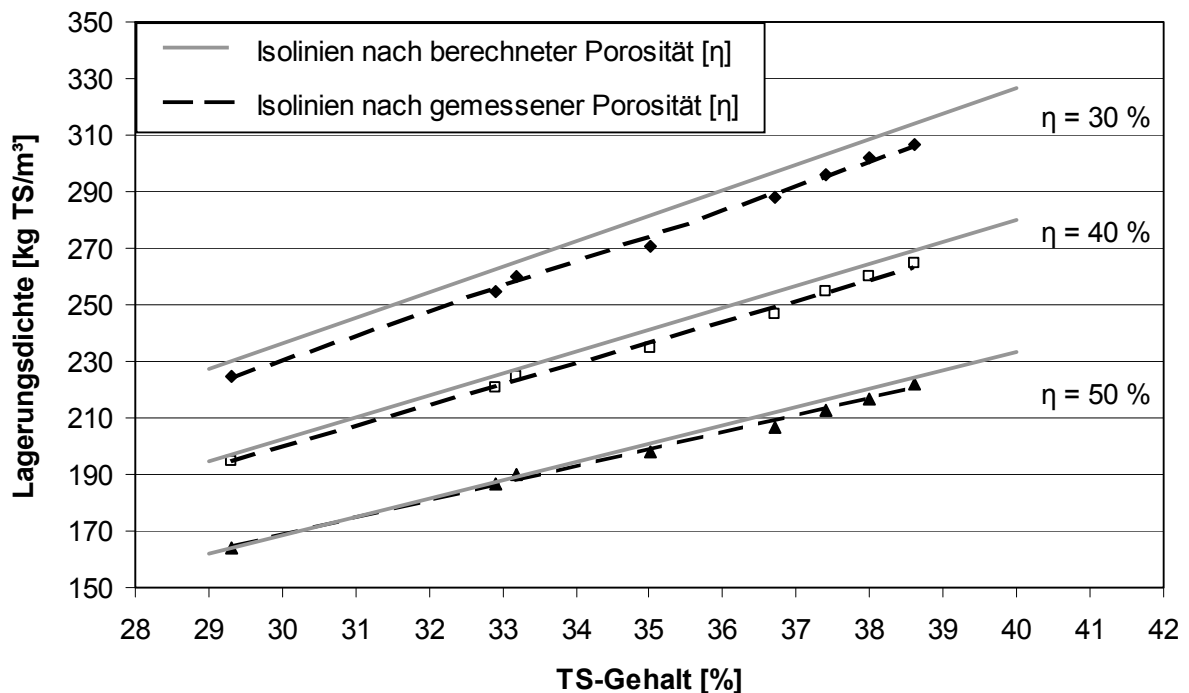
$$\text{Gleichung 21: Porosität } \eta_p = \frac{V_p - \left( \frac{TS_p \cdot m_p}{\rho_{TS}} + \frac{(1 - TS_p) \cdot m_p}{\rho_w} \right)}{V_p}$$

$$\text{Gleichung 22: Lagerungsdichte } \rho_{p(TS)} = TS_p \cdot \rho_{(TS+W)} \cdot (1 - \eta)$$

Die Festsubstanzdichte wurde nach MC RANDAL und MC NULTY (1980) mit  $1420 \text{ kg m}^{-3}$  angenommen und die Dichte des Wassers mit  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ . Die Masse der im

Porenvolumen befindlichen Gase wurde vernachlässigt. Die experimentell und die rechnerisch bestimmten Isoporositätslinien unterscheiden sich nur geringfügig. Bei niedriger Porosität von 30 % ist die Differenz zwischen den Werten etwas größer. Dies könnte in der Abweichung der Trockensubstanzdichte vom angenommenen Wert begründet sein, da dessen relativer Einfluss mit zunehmender TS-Dichte in der Probe steigt.

Bei der experimentellen Messung ist bei verringerter Porosität von einem zunehmenden Messfehler auszugehen, da der Luftaustausch vom Probe- zum Ausgleichsbehälter sinkt. Insgesamt kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die mit der weiterentwickelten Messapparatur bestimmten Werte die realen Porositäten mit einer Abweichung von weniger als 3 % wiedergeben.



**Abbildung 62:** Trockensubstanzdichten von Maissilage in Abhängigkeit des TS-Gehaltes für Linien gleicher Porosität (gemessene Werte und unter Annahme konstanter Festsubstanzdichte berechnete Linien)

Die aus einer Regressionsanalyse ermittelte Schätzfunktion (Kap. 4.2.2) ermöglicht eine direkte Berechnung der Porosität anhand von Trockensubstanzlagerungsdichte und dem TS-Gehalt des Gutes. Die Schätzfunktion wurde auf Basis einer Untersuchung an Maishäckselgut verschiedener TS-Gehalte erstellt, weshalb auch nur hierfür von einer zuverlässigen Vorhersage der Porosität ausgegangen werden kann. Theoretisch müsste die

Funktion jedoch auch bei anderen Siliergütern einzusetzen sein, sofern diese nicht stark abweichende Festsubstanzdichten aufweisen.

## **5.5 Entwicklung eines Regelkreises zur Pressdrucksteuerung**

Die beim Verfahren der Schlauchsilierung über den Bremsdruck einzustellende Verdichtungsintensität wurde bisher vom Maschinenbediener unter Verwendung von Dehnstreifen als Kontrollgröße geregelt. Aufgrund verschiedener Einflussgrößen und wechselnden Bedingungen erfordert die korrekte Anpassung des Bremsdruckes hohe Aufmerksamkeit und Erfahrung vom Bediener, der auch die anderen Maschinenfunktionen zu betätigen hat.

Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz hatte eine Automatisierung der Bremsdruckregelung zum Ziel, die den Bediener bei gleichzeitiger Optimierung der Schlauchfüllung entlastet. Bei der Auslegung der für die Versuche konstruierten Versuchsschlauchpresse galt es zum einen möglichst nahe an den real existierenden Verhältnissen zu bleiben, zum anderen jedoch Versuche unter vertretbarem Materialeinsatz durchführen zu können. Da die Struktur des Pressgutes kaum an die Größenverhältnisse der Presse angepasst werden kann, kam eine Lösung im kleinen Modellmaßstab nicht in Frage. Der gewählte Presstuneldurchmesser von 91 cm und der dazu passende Folienschlauch von 280 cm Umfang erwies sich als geeignet. Zum einen funktionierte der Füllprozess des Schlauches und zum anderen konnte der gepresste Schlauch noch auf einer Palette transportiert und verwogen werden. Nach der Verbesserung technischer Anfangsprobleme verpresste die Versuchsmaschine Maishäckselgut und nachfolgend Hobelspäne als Versuchsmaterial wie vorgestellt.

### **5.5.1 Wahl der Regelgröße**

Für die Entwicklung eines Regelkreises zur Bremsdrucksteuerung galt es zunächst eine geeignete Regelgröße zu definieren, die eine zuverlässige Information über den aktuellen Presszustand gibt. Nach anfänglichen Überlegungen, die an den Seilen gemessene Zugkraft dafür zu nutzen, wurde in Versuchen festgestellt, dass vor allem äußere Einflüsse damit nicht erfasst werden können (Abb. 53). Über die ursprünglich als Regelgröße eingesetzte, manuell gemessene Schlauchdehnung konnte die Summe der verschiedenen Einflussgrößen erfasst werden, was deutliche Vorteile bot. Die technische Online-Erfassung dieser Größe ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Bei Beobachtung des Pressprozesses wurde festgestellt, dass bei steigender Schlauchdehnung (gemessen an den Dehnstreifen) dessen

Kontur sowohl an Breite als auch an Höhe zunimmt. Diese könnten über ortsfest montierte Abstandssensoren erfasst und aus den Kenngrößen der aktuell anliegende Schlauchumfang näherungsweise berechnet werden (Kap. 3.4.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der am Boden anliegende Abschnitt des Schlauchumfanges während der Pressung nur geringfügig gedehnt wird. Die über den Ellipsenumfang berechnete Schlauchdehnung erfordert die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors, da der tatsächliche Schlauchumfang etwas größer ist als der berechnete. Die Größe des Korrekturfaktors hängt von der sich ergebenden Schlauchform ab und wurde durch manuelle Vermessung des Schlauchumfangs bestimmt (Abb. 42). Die niedrigen Werte der Korrekturfaktoren (1,02 bis 1,04) zeigen, dass der Ellipsenumfang den tatsächlichen Umfang des Schlauches sehr gut widerspiegelt. Es ist jedoch anzumerken, dass der Korrekturfaktor sich je nach Siliergut und auch in Abhängigkeit der verwendeten Schlauchgröße ändert, da sowohl das Siliergut als auch die sich ergebende Gesamtgröße des Schlauches Einfluss auf dessen Form haben. Beobachtungen aus der Praxis zeigen, dass Siliergüter mit hohem Trockensubstanzgehalt zu Schlauchformen mit kleiner Breite sowie großer Höhe und feuchte Siliergüter (z.B. Pressschnitzel) zu breit lagernden Schläuchen führen. Deshalb ist der Korrekturfaktor für jede Schlauchgröße und jedes Siliergut zu bestimmen. Hierfür müssten die Schlauchformen bei der Einlagerung im Praxismaßstab in Abhängigkeit des Siliergutes untersucht werden.

Die für die Abstandsmessung eingesetzten Ultraschallsensoren besitzen bei senkrecht zum Sensor stehenden Rückstrahlflächen eine sehr gute Messgenauigkeit ( $\pm 1$  mm). Große Winkelabweichungen, wie sie durch starke Unebenheiten der Schlauchkontur entstehen, können jedoch Fehlmesswerte der Sensoren verursachen. Dieser Problematik konnte durch Filtern der Messwerte begegnet werden. Eine deutliche Verbesserung würden jedoch in dieser Hinsicht robuster messende Abstandssensoren bieten.

Der Abstand der Sensorebene zum Presstunnelende beeinflusst zum einen die Messgenauigkeit der endgültigen Schlauchmaße und zum anderen die Zeitverzögerung der Erfassung einer sich ändernden Schlauchkontur. Bei zu nahe am Presstunnel positionierten Sensoren wird die endgültige Schlauchgröße nicht korrekt gemessen, da noch hinter der Sensorebene eine Nachpressung im Schlauch erfolgt. Sind die Sensoren zu weit hinter dem Presstunnel positioniert, werden sich ändernde Schlauchmaße zu spät erfasst. Aufgrund dessen würde eine auf diesen basierende Pressdruckregelung zu träge reagieren. Der optimale Abstand für die Sensorebene zum Presstunnel befindet sich dort, wo der Schlauch

annähernd seine endgültige Größe erreicht hat. Dieser Abstand ist jedoch auch von den Pressguteigenschaften abhängig, weshalb eine Anpassung erforderlich ist.

Um den Aufwand der Bestimmung von Korrekturfaktoren für die Pressung eines Siliergutes zu umgehen, könnte auch das bisher angewendete Messen der Dehnstreifen eingesetzt werden. Es wäre beispielsweise möglich, zu Beginn einer Pressung den Bremsdruck auf Basis von Erfahrungswerten zu justieren und nach einer Schlauchlänge von wenigen Metern die Schlauchdehnung am Dehnstreifen auf Höhe der Sensorebene zu erfassen. Bei einer Dehnung im Sollbereich könnte der parallel über die Sensoren gemessene Wert des Schlauchumfanges als Sollwert für die automatische Regelung festgelegt werden.

### **5.5.2 Regelung des Bremsdruckes**

Um einen automatischen Regelkreis für den Bremsdruck umsetzen zu können, war eine elektrisch ansteuerbare Druckverstellung erforderlich, wobei die hydraulische Betätigung der Bremse bestehen bleiben musste. Die zur gleichzeitigen Druckerzeugung und Verstellung konstruierte Einheit aus elektrischem Linearantrieb und Hauptbremszylinder arbeitete problemlos und kann sowohl manuell als auch vom Messrechner angesteuert werden. In Verbindung mit dem elektronischen Drucksensor ist eine genaue Bremsdruckeinstellung möglich.

Zur Bereitstellung und Regelung des Bremsdruckes sind auch verschiedene andere technische Lösungen möglich, die zwar in Erwägung gezogen, jedoch nicht weiter verfolgt wurden, da die relativ einfache, elektrisch arbeitende Druckverstellung den Anforderungen genügte. Mögliche Alternativen wären die Einstellung des Hydraulikdruckes durch ein Proportionaldruck-Regelventil, das den Druck im Rücklauf eines Hydraulikkreises regelt (Abb. 37) oder ein pneumatisch-hydraulischer Druckübersetzer, bei dem über die Einstellung des Luftdruckes der Hydraulikdruck variiert wird.

### **5.5.3 Einschätzung der Regelqualität**

Das für die Erfassung der Schlauchdehnung entwickelte Messprinzip ist in der Lage, die Schlauchdehnung in Echtzeit zu messen und bietet somit die Möglichkeit einer zeitnahen Anpassung des Bremsdruckes. Die Messgenauigkeit der verwendeten Ultraschallsensoren ist bei guten Bedingungen (senkrecht zu den Sensoren stehende Rückstrahlflächen) als

hoch anzusehen. Problematisch sind hingegen ungleichmäßige Ausformungen des Schlauches, da diese zum einen durch im Winkel abweichende Rückstrahlflächen die Messgenauigkeit der Sensoren verringern und zum anderen zu einer Abweichung von der angenommenen Ellipsenform des Schlauches führen. Beide Effekte verringern erheblich die Messgenauigkeit. Die Messung der Dehnstreifen bietet in einem solchen Fall jedoch auch nur bedingt Auskunft über die tatsächliche Schlauchdehnung, da die ungleichmäßige Ausformung des Schlauches lokal sehr unterschiedliche Dehnungswerte zur Folge hat. Eine annähernd gleichmäßig ausgeformte Schlauchoberfläche ist deshalb für die einwandfreie Funktion des Messsystems zur Erfassung der Schlauchdehnung notwendig. Im Umkehrschluss gesehen ist es deshalb kaum möglich mit einer automatischen Bremsdruckregelung, die durch Pressung und Formung des Gutstranges verursachten, kleinräumigen Ausformungen des Schlauches auszugleichen. Um in dieser Hinsicht eine gleichmäßigere Schlauchkontur zu realisieren, wären Veränderungen am mechanischen Presssystem und besonders am Presstunnel erforderlich.

Wird der Schlauch gleichmäßig gefüllt und bildet hinter dem Presstunnelausgang eine ebene Oberfläche, bietet die auf den Abstandssensoren basierte Dehnungsmessung eine gute Erfassung der aktuellen Schlauchdehnung. Durch die direkten, aufgrund der Sollwerte ausgeführten Regelvorgänge wird auf eine Veränderung der Schlauchdehnung schnell reagiert. Zur Druckanpassung wurden zwei grundsätzlich verschiedene Regelansätze getestet. Bei sich langsam ändernden äußeren Bedingungen, die zu einer zunehmenden oder abnehmenden Schlauchdehnung führen, hat sich die schrittweise Anpassung des Bremsdruckes in Zeitintervallen als geeigneter Regelansatz erwiesen. Hierbei ist von Vorteil, dass die Pressung bei stets schleifender Bremse erfolgt und so das Siliergut kontinuierlich verdichtet wird. Durch diese Regelung werden keine zusätzlichen Belastungsspitzen für die Mechanik der Presstechnik erzeugt, was in der Praxis für den Arbeitsprozess und die Haltbarkeit der Technik relevant ist.

Bei sehr direkt auftretenden Änderungen der äußeren Einflüsse, wie sie im Versuch durch das Überfahren von Rampen simuliert wurden, ist diese Art der Regelung jedoch nicht geeignet, da für Regeleingriffe mit großer Druckdifferenz mehrere Regelschritte erfolgen müssen. Aufgrund dessen wird zu viel Zeit benötigt, in der die Schlauchdehnung außer Kontrolle gerät. Zum Ausgleich dieser direkt wirkenden Hindernisse hat sich die zweite Regelvariante mit einem Maximal- und Minimaldruck als geeigneter gezeigt (Abb. 55). Bei einer solchen Regelung ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Bremse nicht stetig

nachgibt, sondern im Wechsel schleift und stoppt. Der bei stehender Bremse ansteigende Gegendruck des Gutes am Pressrotor, der sich nach dem folgenden Lösen der Bremse wieder verringert, führt zu einem schwankenden Drehmomentverlauf an der Rotorwelle. Dies war an der wechselnden Belastung des Antriebsschleppers zu erkennen. Bei den mit der Versuchsmaschine durchgeführten Pressungen hatte dies keine weiteren Auswirkungen, weil keine der Antriebskomponenten nur annähernd an der Belastungsgrenze arbeitete. Beim Einsatz in der Praxis könnte dieser Effekt jedoch zu Problemen führen, da der gesamte Antrieb der Presse ohnehin hohen Belastungen unterliegt.

Für die Regelung des Bremsdruckes an Schlauchpressen im Praxismaßstab ist die schrittweise Anpassung des Bremsdruckes vermutlich die besser geeignete Vorgehensweise, da solche direkt einsetzenden Änderungen der äußeren Rahmenbedingungen, wie durch die Rampen verursacht, kaum vorkommen und eine kontinuierliche Pressung bestehen bleibt. Wie sich die Art und Weise einer automatischen Regelung letztlich im Detail auswirkt, kann jedoch nur in Messungen im Praxismaßstab untersucht werden.

## **5.6      Auswirkung der Pressung auf die Partikelstruktur**

Der Vergleich der Massenanteile der Größenklassen des originalen Häckselgutes mit denen des gepressten zeigt, dass vor allem im Längenbereich von 3 bis 15 mm Verschiebungen der Massenanteile zu kleineren Fraktionen durch die Pressung erfolgen (Abb. 57). Eine befürchtete Vermutung trat jedoch nicht auf. Das für den Pressversuch eingesetzte Mais-Häckselgut hatte einen relativ hohen TS-Gehalt von 38 %, weshalb von einer größeren Strukturstabilität auszugehen ist als bei feuchterem Siliergut. Ob die Veränderungen der Partikelstruktur bei der Verdichtung mit Schlauchpressen im Praxiseinsatz in ähnlicher Weise auftritt, kann nicht sicher beantwortet werden. Bei Mais-Häckselgut mit TS-Gehalten von < 30 kann es jedoch zu Presssaftaustritt am Rotor kommen. Nach Erfahrungen in der Praxis kann dies durch einen kontinuierlichen Gutstrom minimiert werden.

Die Einstellung des Pressdruckes über die Bremse hat erheblichen Einfluss auf die Siliergutbeanspruchung und den Presssaftaustritt am Rotor, weshalb bei feuchtem Häckselgut der Pressdruck zu reduzieren ist, um Sickersaftbildung zu vermeiden. Prinzipbedingt wird der Verdichtungsdruck bei einer Rotorschlauchpresse im Vergleich zur Gutverdichtung im Normaldruckverfahren (Kap. 2.3) oder zur Walzfahrzeugverdichtung über eine relativ kleine Kontaktfläche auf das Siliergut übertragen, wodurch eine höhere mechanische

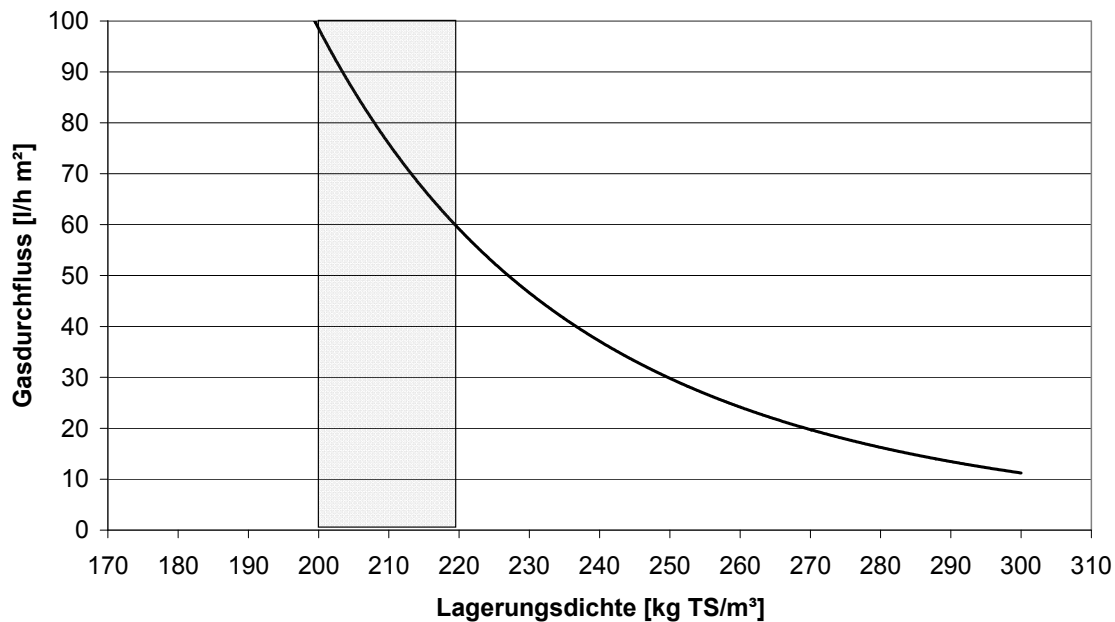


Belastung unvermeidbar ist. Dass die dadurch bedingten, geringfügigen Strukturänderungen einen negativen Einfluss auf die Futtereigenschaften haben, konnte bisher nicht festgestellt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen liegen hierzu bislang nicht vor. In Untersuchungen zum Einfluss der Häcksellänge auf Acidoseparameter bei Milchkühen (STAUFENBIEL et al., 2006) wurden jedoch negative Effekte von sehr kurz gehäckselter Maissilage (theoretische Schnittlänge 5 mm) auf die Tiergesundheit bei maisbetonten Rationen festgestellt. JUNCK et al. (2004) kamen bei in situ Verdaulichkeitsversuchen zu dem Ergebnis, dass eine theoretische Häcksellänge kleiner 8 mm zu einer stark verminderten Strukturwirksamkeit der Maissilage führt. Die Veränderungen der Partikelstruktur durch die Verdichtung am Pressrotor sind demnach bei der Wahl der Häcksellänge zu berücksichtigen und könnten zum Teil durch eine größer gewählte theoretische Häcksellänge beim Ernteprozess ausgeglichen werden.

### **5.7 Einfluss der Schlauchdehnung auf die Lagerungsdichte**

Die während der Pressung eingestellte Schlauchdehnung hatte einen deutlichen Einfluss auf die Verdichtungsintensität und folglich auch auf die erzielte Lagerungsdichte. Die über eine Erhöhung der Schlauchdehnung zu maximierende Verdichtung ist jedoch begrenzt, was auch mit dem Dehnungsverhalten der Schlauchfolie zu erklären ist (Abb. 29). Der Effekt auf die Lagerungsdichte bei einer Steigerung der Schlauchdehnung von 8 % auf 13 % ist deshalb mit ca. 2 % Dichtezunahme relativ gering, wohingegen bei einer Erhöhung der Dehnung von 1 % auf 8 % eine Dichtesteigerung von 10 % erzielt wurde.

Der in Abb. 63 über der Lagerungsdichte aufgetragene Gasdurchfluss zeigt jedoch deutlich den erheblichen Einfluss einer relativ geringen Dichtesteigerung von 10 % bei einem Ausgangsniveau von 200 kg TS m<sup>-3</sup>.



**Abbildung 63: Gasdurchfluss durch eine Maisprobe (35 % TS, 700 mm Höhe) bei einer Druckdifferenz von 0,3 Pa in Abhängigkeit der Lagerungsdichte (mod. nach HONIG, 1987)**

Bedingt durch die steil abfallende Kurve sinkt der Gasdurchfluss von ca. 100 auf  $60 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  um 40 % ab. Da der Gasfluss und die damit verbundene Lufterdringung maßgeblich die Nacherwärmung beeinflusst, ist davon auszugehen, dass sich auch eine geringe Dichtesteigerung positiv auf die Nacherwärmungsproblematik auswirkt.

Der Effekt einer Pressdrucksteigerung auf die Gutverdichtung ist im Schlauchkern stärker als am seitlichen Rand und im oberen Schlauchbereich. Wird davon ausgegangen, dass sich der Pressdruck vom Rotor ähnlich der Druckzwiebel (Abb. 11) einer Reifenauflandsfläche verteilt, ist diese Auswirkung erklärbar. Das am Rand und im oberen Schlauchbereich zum endgültigen Stillstand kommende Pressgut wurde jedoch vorher ebenfalls direkt vom Rotor erfasst und im rotornahen Bereich verdichtet sodass die Verhältnisse nur bedingt vergleichbar sind. Durch die dynamische Bewegung des Siliergutes im Presstunnel kommt es offenbar zu einer Auflockerung des Partikelgefüges. Außerdem ist der statische Druck auf das sich am seitlichen und oberen Rand ablagernde Siliergut geringer, weshalb die Rückstellkräfte im Gut zu einer stärkeren Expansion und somit zu einer Dichteabnahme führen. Pflanzte sich die dynamische Siliergutbewegung bis in den Folienschlauch weit hinter das Presstunnelende fort, ist von einer verstärkten Auflockerung im Bereich unter der Folie auszugehen, da der Widerstand der Folie gegenüber dem bewegten und gleichzeitig expandierenden Siliergut wesentlich geringer ist als der des Press-

tunnels. In diesem Zusammenhang spielen vor allem die Guteigenschaften „innere Reibung“ und „Elastizität“ eine entscheidende Rolle (Kap. 2.4).

Die Ausfüllung und Verdichtung im oberen Presstunnelraum und dem sich anschließenden Folienschlauch basiert auf einer Verschiebung von Siliergut, die gleichzeitig mit einer dichteren Lagerung der Partikel einhergehen muss. Gesteigerte Partikellängen sowie hohe TS-Gehalte führen zur Zunahme von innerer Reibung und Rückfederung und wirken sich dadurch negativ auf den Pressprozess aus. Deshalb ist besonders für die Verdichtung von Gras und Luzerne in Schläuchen auf eine möglichst kurze Schnittlänge als auch auf die Einhaltung der anzustrebenden TS-Gehalte von maximal 35 % zu achten.

Die Messung der Eindringkraft vertikal durch den Schlauch bestätigt die Ergebnisse der Dichtemessung. In der Ebene des Pressrotors ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen, was auf eine höhere Verdichtungsintensität als im darüber liegenden Schlauchabschnitt schließen lässt. Bei der Bewertung der Eindringwiderstandssteigerung in Bezug auf die Lagerungsdichte ist allerdings zu beachten, dass diese nach HESSE et al. (1978) nur unterproportional mit dem Eindringwiderstand zunimmt (Abb. 24). Dieses zeigen auch die auf dem Einstichweg parallel gemessenen Lagerungsdichten deutlich.

Neben der gewünschten Steigerung der Lagerungsdichte über den gesamten Schlauchquerschnitt hat die Einstellung einer optimalen Schlauchdehnung weitere positive Auswirkungen. Zum einen liegt die Folie ganzflächig an der Siliergutoberfläche an, wodurch der Luftzutritt unter die Folie bei offenem Anschnitt minimiert wird und zum anderen ist von einem geringfügig vergrößerten Silovolumen pro laufenden Meter Schlauch auszugehen. Eine Steigerung des durchschnittlichen Schlauchumfangs um 3 % in Kombination mit einer verbesserten Siliergutverdichtung von nur 3 % würde die pro Laufmeter eingelagerte Siliergutmasse um 10 % erhöhen und somit die spezifischen Folienkosten je m<sup>3</sup> Siliergut senken.

## **5.8 Schlussfolgerungen und mögliche Optimierungsansätze für das Verfahren der Schlauchsilierung**

Das Folienschlauchverfahren bietet aus Sicht des Gärprozesses durch den schnellen, nahezu vollständigen Luftabschluss sehr gute Grundvoraussetzungen für eine verlustarme Silierung unter anaeroben Bedingungen (SCHIEL und WINTER, 1996). Bei geöffnetem Silo kann es durch Kohlendioxidabfluss und Sauerstoffzutritt zu einem aeroben Stoffumsatz mit

dadurch verursachter Nacherwärmung kommen. Neben der Einhaltung eines ausreichenden Entnahmevorschubs sowie durch Einsatz von Silierzusätzen kann die Nacherwärmung durch Minimierung des Gasaustausches vermieden bzw. verringert werden. Hierfür sind vor allem die Verdichtung des Siliergutes und das Anliegen der gespannten Folie am Schlauchumfang zu optimieren. Der Gasaustausch durch die beschädigungsfreie Schlauchfolie ist hingegen sehr gering.

- Das Anliegen der Schlauchfolie am Gut ist durch eine gleichmäßige Füllung unter konstanter Dehnung sowie einer eben gerundeten Schlauchform zu erreichen.
- Eine automatische Regelung des Bremsdruckes, wie sie hier vorgestellt wurde, könnte zu einer gleichmäßigeren Füllung über die Schlauchlänge beitragen, da der Maschinenbediener von seiner ständigen Regelaufgabe entlastet würde und so die Gefahr einer Fehleinstellung verringert werden kann.
- Eine verlässliche, automatische Regelung bietet die Möglichkeit die Schlauchdehnung weiter auszureizen, da eine Überdehnung der Folie durch schnelle Reaktionen des Systems verhindert würde.
- Die Aufzeichnung der Schlauchquerschnittsfläche über die Schlauchlänge könnte für eine Abschätzung des Silovolumens und bei bekannter Durchschnittsdichte auch für die Berechnung der eingelagerten Erntegutmasse genutzt werden. Auf dieser Basis könnte eine massenbezogene Abrechnung des Lohnunternehmers ohne Verwiegung des Siliergutes durchgeführt werden.
- Eine optimierte Schlauchdehnung führt zu einer verbesserten Verdichtung des Siliergutes, wobei die Dichtesteigerung durch das Dehnverhalten der Folie begrenzt ist. Der Einsatz von Folien mit erhöhter Zugdehnung könnte dabei noch für eine gewisse Steigerung sorgen, ist aber aus Gründen der Kosten und des Materialverbrauchs zu überdenken.
- Die Bildung von lokalen, durch den Pressprozess verursachten Beulen an der Schlauchoberfläche kann durch eine automatische Pressdruckregelung kaum verhindert werden. Hierfür wären Verbesserungen an der Mechanik der Presse, vor allem an der Presstunnelgestaltung, besser geeignet. Sowohl Erfahrungen aus der Praxis als auch Beobachtungen während der Versuchspressungen zeigen, dass durch einen verlängerten Presstunnel die Schlauchkontur optimiert werden könnte.

- Die Messungen von Lagerungsdichte und Eindringkraft an den Versuchsschläuchen bestätigen, dass die Verdichtungswirkung auf der Ebene des Pressrotors besonders intensiv ist. Der Bereich darunter weist Dichten auf gleichem Niveau auf, während von der Rotorebene nach oben die Lagerungsdichte stetig abnimmt. Für eine Steigerung der Verdichtung im oberen Schlauchbereich ist deshalb zu überlegen, den Pressrotor gegenüber dem Presstunnel auf einer höheren Ebene zu platzieren. Dies könnte jedoch zu einem verstärkten „Überschieben“ von Pressgut nahe der Tunneloberkante führen, was durch die Tunnelgestaltung verhindert werden müsste. Ob die Presswirkung durch eine solche technische Veränderung insgesamt zu verbessern ist, kann letztlich nur in weiteren Experimenten geklärt werden.
- Die im Rahmen der Versuche eingesetzten Ultraschall-Abstandssensoren sind bei einer unebenen Schlauchkontur problematisch, da stärkere Winkelabweichungen der Rückstrahlfläche zu Messfehlern führen. Kürzlich am Markt eingeführte Laserabstandssensoren, die auf Basis von Streulicht messen, bieten hier eine interessante Alternative, da diese auch bei spitzen Auftreffwinkeln eine korrekte Messung ermöglichen. Ein Test eines solchen Sensortyps im Rahmen der Schlauchvermessung könnte Aufschluss über mögliche Vorteile bringen.

## 6 Zusammenfassung

Die Silagebereitung im Folienschlauch ist ein bereits seit fast 40 Jahren als Alternative zum Hoch- und Flachsilo entwickeltes Verfahren. Das auch heute noch eingesetzte Arbeitsprinzip beruht auf einer speziellen Förder- und Presstechnik, mit der das zu konservierende Siliergut in einen „endlosen“ Kunststoffschlauch eingelagert wird. Verbesserungen der Presstechnik und vor allem auf Seiten der Folienschläuche, z.B. die Entwicklung einer mechanisierten Falttechnik, haben die Leistungsfähigkeit des Verfahrens erheblich erhöht, sodass es heute auch in leistungsstarken Futterernteketten eingesetzt werden kann.

Eine Steigerung der Siliergutverdichtung könnte die sehr guten Konservierungsbedingungen während der geschlossenen Lagerung auch für die Phase der Siloentnahme im Sinne der Qualitätssicherung optimieren. Die bisher vom Maschinenbediener manuell zu regelnde Einstellung des Pressdruckes hat sich in diesem Zusammenhang als ein kritischer Punkt herausgestellt, da eine Fehleinstellung einerseits zu verringerter Siliergutverdichtung und andererseits im Extremfall zum Platzen des Schlauches führen kann.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, auf Basis einer differenzierten Untersuchung der Lagerungsdichte an Schlauchsilagen sowie des Zusammenhangs zwischen Lagerungsdichte, TS-Gehalt und Porosität eine Technik für die Optimierung der Schlauchfüllung zu entwickeln. Zur Ausschöpfung des Potenzials der vorhandenen Presstechnik und der Minimierung der Gefahr von Bedienfehlern bot eine automatisierte Pressdruckregelung erfolgsversprechende Verbesserungsmöglichkeiten. Mit Hilfe einer solchen Regelung sollte eine gleichmäßigere Schlauchfüllung unabhängig vom Einfluss des Maschinenbedieners realisiert werden.

Für die Probenahme zur Dichtebestimmung wurde ein hierfür am Institut konstruierter Bohrstock eingesetzt. Die gemessene durchschnittliche Lagerungsdichte lag mit Werten von 170 bis 220 kg TS m<sup>-3</sup> bei Silomais und 150 bis 200 kg TS m<sup>-3</sup> bei Grassilage auf ähnlichem Niveau wie es auch in früheren Studien an Flachsilos festgestellt wurde. Die Dichtedifferenz zwischen Schlauchkern und den Randbereichen nahe der Folie war mit 25 bis 35 % je nach Siliergut relativ hoch. Bei einem Vergleich der bei Dichten auf diesem Niveau gemessenen Porositätswerte und der auf Basis der Literatur anzunehmenden Wirkung auf den Gasaustausch, ist für Silagen höheren TS-Gehaltes von einer zu geringen Verdichtung im oberen Bereich der Schlauchsilos auszugehen. Um die Porosität im TS-Bereich von 30 bis 40 % auf einem Niveau von 40 vol. % zu halten, ist eine Steigerung der

TS-Dichte um 8 kg TS pro Prozent TS-Gehalts-Zunahme erforderlich. Eine Dichtezunahme in dieser Größenordnung wurde in den beprobten Schlauchsilagen als auch in früheren Untersuchungen an Flachsilos nicht festgestellt. Deshalb ist auch bei der Einlagerung in Folienschläuche von Siliergütern relativ hoher TS-Gehalte aufgrund der zu erwartenden Zunahme der Porosität ein erhöhtes Risiko der Nacherwärmung zu berücksichtigen.

Für die Durchführung der Pressversuche zur Entwicklung einer regelkreisgesteuerten Pressdruckeinstellung wurde eine Versuchsschlauchpresse in einem Maßstab von ca. 1:3 konstruiert. Als Regelgröße für den Pressdruck wurde nach den ersten Versuchen, wie bei der manuellen Regelung, die Schlauchdehnung eingesetzt, wobei diese unter Verwendung von Abstandssensoren am Schlauchumfang über die Messung der Schlauchmaße (Höhe und Breite) berechnet wird. Die Bremsdruckanpassung erfolgt durch einen stellmotorbetätigten Hauptbremszylinder, der zum einen über Steuerbefehle vom Messrechner und zum anderen über manuelle Schalter anzusteuern ist. Über Festlegung eines Sollwertes sowie eines Toleranzbereiches für die Schlauchdehnung werden die Grenzwerte für eine Druckanpassung gewählt. Diese kann einerseits in kleinen Schritten mit Zeitintervallen oder nach einem „Stop-and-Go“ Prinzip erfolgen, bei dem der Bremsdruck zwischen hohem und niedrigem Druck gewechselt wird und dadurch die Bremse stoppt oder nachgibt. Bei gleichmäßigen äußeren Bedingung hat sich erstgenannte Art der Regelung zur Konstanzhaltung der Schlauchdehnung als gut geeignet erwiesen, wohingegen stark wechselnde äußere Einflüsse, wie sie im Versuch durch zusätzliche Rollwiderstände simuliert wurden, besser bei der „Stop-and-Go“ Regelung ausgeglichen werden. Aufgrund der Gegebenheiten in der Praxis ist anzunehmen, dass die „Anpassung des Bremsdruckes in Schritten“ die besser geeignete Variante ist.

An den Versuchsschläuchen wurde die Lagerungsdichte bei verschiedenen Stufen der Schlauchdehnung differenziert über den Schlauchquerschnitt untersucht und deren deutlicher Einfluss festgestellt. Die Steigerung der Dehnung von 1 auf 8 % führte zu einer Zunahme der durchschnittlichen Lagerungsdichte von ca. 10 %, während eine weiter gesteigerte Schlauchdehnung auf 13 % mit nur 2 % Dichtezuwachs eine kaum messbare Steigerung erbrachte. Die Zunahme der Dichte war im Kern insgesamt stärker ausgeprägt als in den Randbereichen des Schlauches. Eine noch weiter erhöhte Schlauchdehnung erscheint aus Sicht der Verdichtungswirkung und im Hinblick auf das Dehnungsverhalten der verwendeten Polyethylenfolie als nicht sinnvoll. Eine weitere Maximierung der

Siliergutverdichtung wäre jedoch eventuell über Änderungen an Verdichtungswerkzeugen und des Presstunnels der Presse zu erreichen.

Die im Rahmen der experimentellen Untersuchung entwickelte, automatische Bremsdruckregelung stellt insgesamt eine geeignete Option dar, die mögliche Schlauchfüllung unter Beibehaltung der verwendeten Presstechnik besser auszunutzen, den Maschinenbediener gleichzeitig zu entlasten und die Futterqualität zu sichern.



## 7 Literaturverzeichnis

- AMARAL, R.C.; L.G. NUSSIO; T.F. BERNARDES; J.O. SATURI; G.B. MURARO; J.L.P. DANIEL (2009): Top losses in silos containing corn silage according to the sealing method adopted. In: Proceedings, XV<sup>th</sup> International Silage Conference, July 27-29 2009, Madison, S. 197-198
- AMMAN, H.; R. FRICK (2005): Silierverfahren im Vergleich. In: FAT-Berichte, 627, S. 1-20
- AMOURS, L.D.; P. SAVOIE (2005): Density profile of corn silage in bunker silos. In: Canadian Biosystems Engineering, 47, S. 221-228
- ASHBELL, G.; N. LISKER (1988): Aerobic deterioration in maize silage stored in a bunker silo under farm conditions. In: J.Sci. Food Agric. 45, S 307-315
- AUERBACH, H. (1996): Verfahrensgrundlagen zur Senkung des Risikos eines Befalls von Silagen mit *Penicillium roqueforti* und einer Kontamination mit Mykotoxinen dieses Schimmelpilzes. Dissertation, Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 168, Hohenheim
- AUERBACH, H. (2004): Mittel zur Erhöhung der aeroben Stabilität von Silagen und zur Stabilisierung von Anschnittsflächen und TMR. Präsentation, Sächsischer Futtertag, 14. April 2004, Nossen
- BERG, K. (1971): Die Trockensubstanzbestimmung von Silagen und die Erfassung flüchtiger, den Futterwert beeinflussender Verbindungen sowie Modellversuche zur Ermittlung des Gärverlustes. Dissertation, Deutsche Akademie der Landwissensch. Berlin
- BÖNIG, I. (2006): Die Verdichtung von Laub in Rundballenpressen. Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- BORREANI, G.; A. REVELLO CHION; E. TABACCO (2009): Enhancing oxygen impermeability of stretch film for wrapped silage with the use of new polymers. In: Proceedings, XV<sup>th</sup> International Silage Conference, July 27-29 2009, Madison, S. 97-98
- BUESCHER, W.; Y. SUN; P. SCHULZE LAMMERS; F. ROß; C. MAACK; J. LIN; Q. CHENG; W. SUN (2009): Verbesserte Dichtebestimmung von Silageballen mit Penetrometern. In: Landtechnik, 64. Jg., H. 3, S. 187-190
- DEDERER, M. (1988): Ermittlung von Verfahrenskennwerten und vergleichende Beurteilung von Konservierungsverfahren für Corn-Cob-Mix. Dissertation, Hohenheim
- DERNEDDE, W.; H. HONIG (1977): Auswirkung der Häcksellänge auf das Silomaisverfahren. In: Landbauforschung Völknerode, 27. Jg., H. 1, S. 60-66

- DERNEDDE, W. (1983): Der Einfluß verschiedener Faktoren auf die Verdichtung von Gras in Lagerbehältern bei statischer Belastung. In: Landbauforschung Völkenrode, 33. Jg., H. 4, S. 259-263
- DEWAR, W. A.; P. MC DONALD (1961): Determination of dry matter in silage by distillation with toluene. In: Journal of the Science of Food and Agriculture, 12, S. 790-795
- DLG (2000): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. Frankfurt am Main
- DLG e. V. (2006): Praxishandbuch Futterkonservierung – Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. 7. Aufl., Frankfurt am Main
- DLG e.V. (2008): Persönliche Mitteilung.
- EBERHARDT, Gebr. (1972): Verfahren zur Flachlagerung von landwirtschaftlichem Gut, insbesondere Feldfutter. Patentschrift Nr. 520 609, Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Amt für Geistiges Eigentum (Hrsg.), Ulm/Donau
- EGGENMÜLLER, A. (2004): Verfahren zum Füllen bzw. Erstellen von Lagerstätten für landwirtschaftliche Güter. Offenlegungsschrift DE 102 58 641 A 1, Bundesrepublik Deutschland, Deutsches Patent- und Markenamt
- EGGENMÜLLER, A. (2002): Verfahren und Einrichtung zur Flachlagerung landwirtschaftlicher Güter unter einer tunnelartig ausgebildeten Abdeckung. Offenlegungsschrift DE 100 32 824 A 1, Bundesrepublik Deutschland. Deutsches Patent- und Markenamt
- FÜRLI, C.; H. SCHEMEL, C. IDLER, V. SCHOLZ (2007): Anforderungen an die Logistik zur Sicherung hoher Silagequalitäten. In: Agrartechnische Forschung 13, Nr. 6, S. 214-220
- FÜRLI, C.; H. SCHEMEL; D. KOEPPEN (2008): Principles for measuring density in silages. In: Landtechnik, 63 Jg., H. 2, S. 94-95
- GROSS, F.; K. RIEBE (1974): Gärfutter. Stuttgart
- HÄBLER, J.; R. TÖLLE; J. HAHN (2008): Vibrationswalzen zur Verdichtung von Siliergut. In: Landtechnik, 63. Jg., H. 1, S. 28-29
- HARMS, H.-H. (1994): Verdichtungstechnik. Landtechnik, 49 Jg., H. 3, S. 142-144
- HERTWIG, F. (2004): Siliermittel: Welche Mittel für welchen Zweck? Tagung Landtechnik für Profis, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Nr. 14, Magdeburg
- HESSE, T.; B. SCHEUFLER (1978): Dichtemessung an Großballen mit Hilfe des Spitzendrucksondiervorgangs. In: Grundlagen der Landtechnik 28, H. 3, S. 113-117

- HOFFMANN, O. H. (1975): Verdichtungsverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth Gesellschaft, Bd. 10, Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- HOLMES, B. J.; K. K. BOLSEN (2009): What's new in silage management? In: Proceedings, XV<sup>th</sup> International Silage Conference, July 27-29 2009, Madison, S. 61-76
- HONIG, H.; K. ROHR (1982): Einfluss der Häcksellänge auf den Siliervorgang. In: Mais 4/82, S. 8-10
- HONIG, H.; G. PAHLOW (1986): Wirkungsweise und Einsatzgrenzen von Silage-Impfkulturen aus Milchsäurebakterien. In: Das wirtschaftseigene Futter 32, S. 205-228
- HONIG, H. (1987): Influence of forage type and consolidation on gas exchange and losses in silo. In: Summary of papers, 8<sup>th</sup> Silage Conference, Hurley (UK), 51-52
- JAKOB, R.; E. SPIESS (1982): Ernte, Silieren und Füttern von CCM. DLZ 9/1982, S. 1212-1217
- JEROCH, H.; W. DROCHNER; O. SIMON (1999): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Stuttgart
- JOHANNING, B. (2000): Ein Beitrag zur Entwicklung und Optimierung von Compactrollenpressen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Bd. 99, Düsseldorf
- JUNCK, B.; M. TAF AJ; Q. ZEBELI; R. FUNK,; H. STEINGAß; W. DROCHNER (2004): Einfluss der Häcksellänge auf Strukturwert und Qualität der Maissilage. In: Tagungsband, 116. VDLUFA Kongress, Rostock, S. 96
- JUNGBLUTH, T.; W. BÜSCHER ; M. KRAUSE (2005): Technik Tierhaltung. Stuttgart
- KLEINMANS, J.; B. RUSER; G. OETJEN, J. THAYSEN (2005): Eine neue Methode zur Bestimmung der Verdichtung in Praxissilos. In: Mais, 4/2005
- KRAXNER, H. (1979): Ökonomik der Gewinnung und Verwertung von Kolbenschrotsilage. Dissertation, Technische Universität München
- KREIPE, H. (1975): Die Konservierung von Feuchtgetreide aus der Sicht der Brennerei. In: Die Brennereiwirtschaft 6, 1975, S. 89-96
- KROMER, K.-H. (1993): Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 60, Düsseldorf
- KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 13. Aufl., Darmstadt
- LEURS, K. (2006): Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Silieigenschaften von Mais. Forschungsbericht Agrartechnik 438, Selbstverlag, Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

- MATTHIESEN, M. (2006): Persönliche Mitteilung.
- MATTHIESEN, M. (2007): Einfluss der Getreideart auf physikalische Kenngrößen von Feuchtgetreide. In: Landtechnik, 62. Jg., S. 218-219
- MATTHIESEN, M. (2008): Experimentelle Untersuchungen zur Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch. Forschungsbericht Agrartechnik 468, Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn
- MC DONALD, P., HENDERSON, A. R., HERON, S. J. E. (1991): The biochemistry of silage. Chalcombe Publications, Marlow
- MC RANDAL, D. J.; P. B. MC NULTY (1980): Mechanical and physical properties of grasses. In: Transaction of the ASAE 23, S. 816-823
- MEISE, S.; O, STEINHÖFEL; U. WEBER (2006): Dick allein genügt nicht – Folienqualität von Siloschläuchen. Neue Landwirtschaft, 4-2006-Sonderdruck, Berlin
- MEISE, S. (2008): Persönliche Mitteilung.
- MORIZ, C. (2008): Überbetriebliche Ernte von Grassilage – Quaderballen als Alternative zu Feldhäcksler und Ladewagen? In: LAND. TECHNIK 2008. Landtechnik regional und international. Tagung Stuttgart-Hohenheim, 25. und 26. September 2008, VDI-MEG, Düsseldorf, S. 231-236
- MUCK, R. E.; B. J. HOLMES (2000): Factors affecting bunker silo densities. In: Appl. Engr. Agric. 15(6), S. 613-619
- MUCK, R. E.; B. J. HOLMES (2001): Density and Losses in Pressed Bag Silos. 2001 ASAE Annual International Meeting, Paper Number 01-1091, Sacramento
- MUCK, R. E.; B. J. HOLMES (2004): Bag Silo Densities and Losses. ASAE Paper Number 041141, 2004 ASAE/CSAE Annual Meeting, Fairmont Chateau Laurier, The Westin, Government Centre Ottawa, Ontario, Canada, 1.-4. August 2004
- NUSSBAUM, H. J. (2006): Umgang mit nicht optimal konservierten Silagen. In: Praxis-handbuch Futterkonservierung. 7. Aufl., S. 83-90
- OPITZ VON BOBERFELD, W. (1994): Grünlandlehre: biologische und ökologische Grundlagen. Stuttgart
- PAHLOW, G. (2003): Gärungsbiologische Grundlagen der Silagebereitung und ihre Auswirkungen auf die Silierpraxis. In: Bemerkungen über das Silieren. Horsholm, S. 29-41
- PAHLOW, G., H. HONIG, S. MARTENS (2004): Simple laboratory scale techniques for monitoring and controlling the lactic acid fermentation and shelf life of feeds and foods. Food safety under extreme conditions – A conference on small-scale producing units of traditional fermented foods, Jaén (Spain), September 6-8, 2004

- PAHLOW, G. (2006): Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futterkonservierung. 7. Aufl., S. 11-30
- PARSONS, D. J.; R. P. HOXEY (1988): A technique for measuring the permeability of silage at low pressure gradients. In: Journal of Agricultural Engineering Research, 40, S. 303-307
- PATZOLD, V.; G. GRUHN; C. DREBENSTEDT (2007): Der Nassabbau: Bewertung, Erkundung, Gewinnung und Aufbereitung. 1. Aufl., Berlin
- PIRKELMANN, H. (1988): Siliertechnische Maßnahmen zur Verbesserung der Silagequalität im Fahrlo. In: 28. Techniken zur Verbesserung der Grundfutterkonservierung, Bericht über die Jahrestagung der Landtechnik Weihenstephan in Penzig, 25. November 1988, S. 64-72
- PITT, R. E. (1983): Mathematical predication of density and temperature of ensiled forage. In: Trans. ASAE, 26, S. 1522-1527
- PITT, R. E. (1986): Dry matter losses due to oxygen infiltration in silos. In: Journal of Agricultural Engineering Research, 35, S. 193-205
- REES, D.V.H.; E. AUDSLEY; M. A. NEALE (1983): Apparatus for obtaining an undisturbed core of silage and for obtaining an undisturbed core of silage and for measuring the porosity and gas diffusion of the sample. In: Journal of Agricultural Engineering Research 28, S. 107-114
- RESCH, R. (2002): 35 Jahre Gumpensteiner Silierversuche. In: 8. Alpenländisches Expertenforum, „Zeitgemäße Futterkonservierung“ 9.-10. April 2002, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, S. 31-38
- REXILIUS, R. (1985): Konservierungsbedingte Verluste bei der Silierung von Ährengetreide und Körnermais. Universität Hohenheim
- RICH, K.; T. SCHOORL; S. WIGLEY; J.M. WILKINSON (2009): Effect of an oxygen barrier film (“Silostop”) on composition and losses of organic matter from the upper layers of forage sorghum ensiled in large bunker silos. In: Proceedings, XV<sup>th</sup> International Silage Conference, July 27-29 2009, Madison, S. 305-306
- ROß, F. (2008): Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des Porenvolumens in Siliergütern unter Anwendung präventiver Qualitätsmanagement-Methoden. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Willhelms-Universität zu Bonn
- RUSER, B.; G. PAHLOW (2003): Warum Silagen warm werden. In Internet: [http://www.pioneer.com/germany/asft\\_warum\\_silagen\\_warm\\_werden.htm](http://www.pioneer.com/germany/asft_warum_silagen_warm_werden.htm), 14.08.2003
- SAVOIE, P; K. J. SHINNERS (2009): Advances in silage harvesting. In: Proceedings, XV<sup>th</sup> International Silage Conference, July 27-29 2009, Madison, S. 169-177

- SACHT, H. O. (1966): Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 4
- SCHIEL, A.; P. WINTER (1996): Gute Silage aus dem Schlauch. In: top agrar, 8/1996, S. 72-75
- SEMME, H.; R. HORN (1995): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. In: KTBL-Schrift 362: Bodenverdichtung, S. 61-92
- SÖHNE, W. (1952): Die Verformbarkeit des Ackerbodens. In: Grundlagen der Landtechnik, H. 3, S. 51-59
- SPIEKERS, H. (1998): Nacherwärmung der Maissilage – Dichte ist die halbe Miete. In: Milchpraxis, 36. Jg., Nr. 3, S. 145-147
- SPIEKERS, H. (2006): Grundlagen der Silierung – Einleitung und Zielgrößen. In: Praxis-handbuch Futterkonservierung. 7. Aufl., S. 7-10
- SPIEKERS, H.; R. MILTNER; W. BECKER (2004): „Aktion Nacherwärmung“ deckt Schwachpunkte auf. In: top agrar, H. 2, S. R10-13
- SPIEKERS, H.; W. POTTHAST (2004): Erfolgreiche Milchviehfütterung. Frankfurt
- STAUFENBIEL R.; S. BANDILLA; H. VAN DE SAND; M. PRIES (2006): Einfluss der Häcksellänge von Maissilage auf Leistung und Acidoseparameter bei Milchkühen. Forum angewandte Forschung, 05/06. April 2006
- STEINHÖFEL, O. (2001): Silierung im Folienschlauch – Wo passt sie hin? top agrar-spezial, 9/2001, S. 19-22
- STEINHÖFEL, O.; U. WEBER (2004): Mit Thermobildern Nacherwärmung auf der Spur. In: DLZ, H. 3, S. 108-112
- STEINHÖFEL, O.; U. WEBER (2005): Haben sie noch Fragen zur AG BAG Schlauchtechnologie? In: BAG Budissa Agroservice GmbH (Hrsg.): Haben Sie noch Fragen zur Schlauchsilierung? 2. Aufl, Malschwitz/Kleinbautzen, S. 1-31
- STEINHÖFEL, O.; U. WEBER (2006): Feuchtkornmais im Schlauch rechnet sich. DLZ 9/2006, S. 102-104
- THAYSEN, J. (2004): Die Produktion von qualitativ hochwertigen Grassilagen. In: Übers. Tierernährung 32, S. 57-102
- THAYSEN, J.; B. RUSER; J. KLEINMANN (2006): Dichte Controlling – Bedeutung und Instrumente. In: Tagungsband GKL-Frühjahrstagung 2006, Sektion Bau und Technik, S. 14-17

- THAYSEN, J. (2008a): Dichte Controlling – Bedeutung und Instrumente. WGM, 9. Jahrestagung, Futterkamp, S. 48- 53
- THAYSEN, J. (2008b): Neue Technik für die Ballensilage. In: Lohnunternehmen, H. 4, S. 46-49
- THORSTEINSON, B.; B. GUDMUNDSSON; BRYNJOLFSSON, R. (1996): Grass carbohydrates and silage quality. In: Proceedings of the XIth International Silage Conference, Aberystwyth, 8.-11.09.1996, Iger, Aberystwyth, S. 50-51
- UHRFELL, J. (2008): Persönliche Mitteilung.
- VERBAND DER LANDWIRTSCHAFTSBERATER e. V. (Hrsg.) (1988): Landwirtschaft 3. Landtechnik, Bauwesen. Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen. Verfahrenstechniken, Arbeit, Gebäude, Umwelt. 9. Aufl., München
- WAGNER, A. (2005): Qualitätsmanagement bei der Futterernte. Einflüsse der Erntetechnik auf den Qualitätsparameter „Langzeitstabilität“ von Silagen. Habilitationsschrift, Bonn 2005
- WAGNER, A. (2006): Persönliche Mitteilung.
- WEBER, U. (2005): Untersuchung zur Silierung von Zuckerrübenpressschnitzeln in Folienschläuchen. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- WEBER, G. (2009): Untersuchungen zur Silierung von Biertrebern. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- WEIßBACH, F. (1968): Beziehungen zwischen Ausgangsmaterial und Gärungsverlauf bei der Grünfuttersilierung. Habilitationsschrift, Rostock
- WEIßBACH, F. (1998): Über die Bestimmung der Gärverluste in Silierversuchen unter Laborbedingungen. In: Kongreßband, VDLUFA-Schriftenreihe 49, S. 461-465
- WEIßBACH, F. (2002): Grundlagen und Praxis der Produktion guter Grassilagen. 8. Alpenländisches Expertenforum, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irndning
- WENCK, C.; H. P. PFIRTER; A. L. PRABUCKI (1973): Maiskörner und Trockenschrote in der Schweinemast. In: Die Grüne 41, S. 1485-1500
- WESCHE, H. (1995): Untersuchungen zur Optimierung des Compactrollenverfahrens. VDI Fortschritt-Bericht, Reihe 14, Nr. 71, Dissertation, Düsseldorf
- WIENECKE, F. (1956): Reibungswerte von Pflanzen und Farbstoffe. In: Landtechnische Forschung 6, H. 5, S. 146-151
- WILLIAMS, A.G. (1994): The permeability and porosity of grass silage as affected by dry matter. In: Journal of Agricultural Engineering Research 59, S. 133-146

- WOBSER, T. (1993): Silieren im Folienschlauch – eine Alternative zum Flachsilo?  
In: Bauernzeitung. Landwirtschaftliches Wochenblatt; 34 (40), S. 34-35
- WOLFF-REGETT, K.-P. (1989): Verdichtung und Expansion von Halmgut in Normaldruck-Ballenpressen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 41
- WOOLFORD, M. K. (1975): Microbiological screening of the straight chain fatty acids (C1-C12) as potential silage additives. In: J. Sci. Food Agric. 26, S. 219-228
- WYSS, U. (2000): Siliermittel und aerobe Stabilität – Testergebnisse 1999. In: Agrarforschung 7 (7), S. 297-301



## 8 Anhang

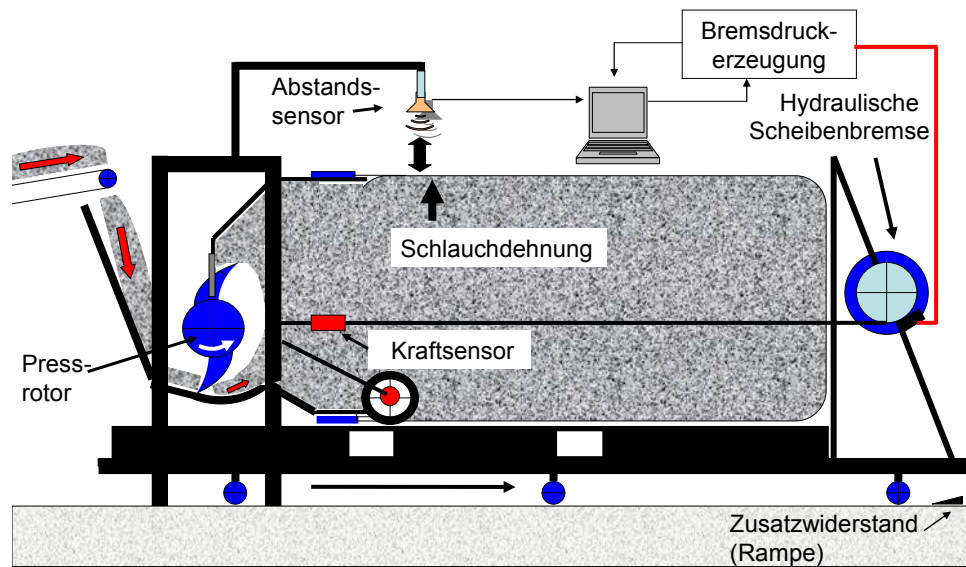


Abb. A. 1: Aufbau und Funktion der Versuchsschlauchpresse mit automatischer Bremsdruckregelung

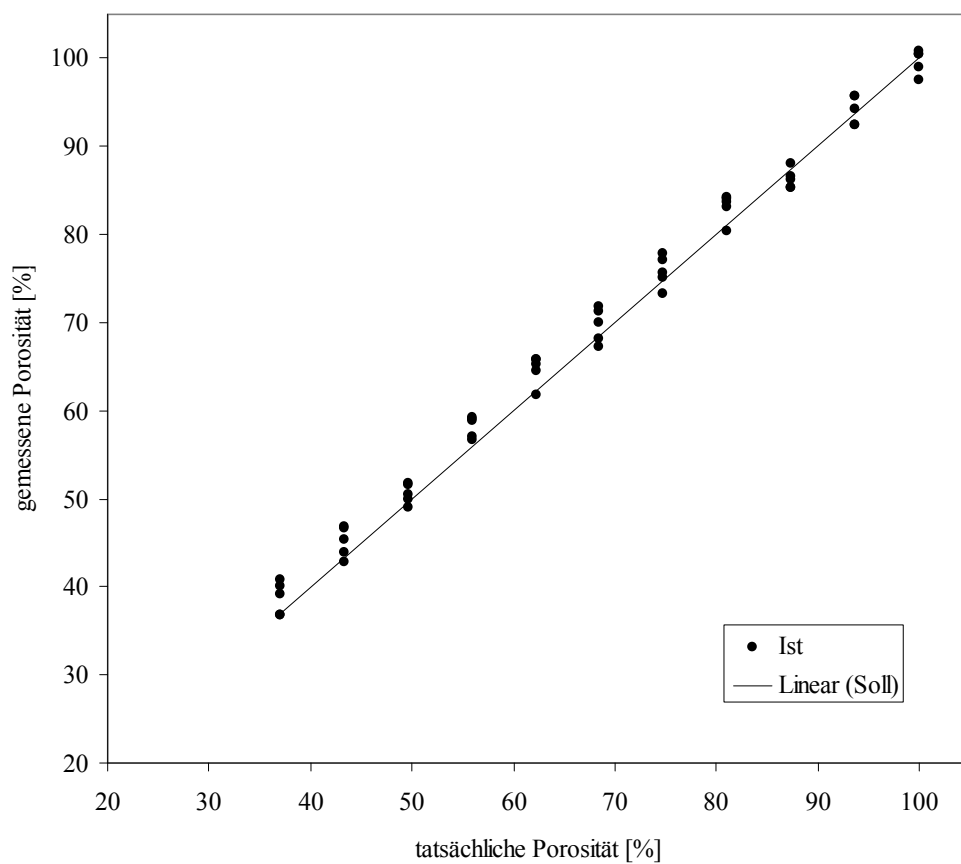


Abb. A. 2: Über Druckdifferenz bestimmte Porosität gegenüber der geometrisch gemessenen Porosität (n = 5)

**Tab. A. 1: Einfüllmassen für die Herstellung der definierten Dichtestufen**

<b>Dichte</b> <b>[kg TS m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Einfüllmasse</b> <b>[kg TS / 1,77077 l]</b>	<b>Einfüllmasse</b> <b>[kg FS / 1,77077 l]</b>
150	0,2656	0,8854
170	0,3010	1,0034
190	0,3364	1,1215
210	0,3719	1,2395
230	0,4073	1,3576
250	0,4427	1,4756
270	0,4781	1,5937
290	0,5135	1,7117

**Tab. A. 2: Maße und Gewichte der Versuchspresse**

1) Maschinenlänge	6.072 mm	9) Durchmesser Rotorwelle	140 mm
2) Maschinenbreite	2.818 mm	10) Zahnbreite	16 mm
3) Maschinenhöhe	2.212 mm	11) Anzahl Zähne	32
4) Gesamtlänge	9.500 mm	12) Durchgangbreite Abstreifer	18 mm
5) Länge Schlauchauflage	4.000 mm	13) Presstunnelumfang	2.627 mm
6) Breite Schlauchauflage	1.200 mm	14) Breite Befülltrichter	2.005 mm
7) Rotorbreite	820 mm	15) Gewicht Fahrwagen	1.050 kg
8) Rotordurchmesser	370 mm	16) Gewicht Presseinheit	850 kg

**Tab. A. 3: Kenngrößen der an der Versuchsmaschine eingesetzten Sensoren**

<b>Sensortyp</b>	<b>Messgröße</b>	<b>Messprinzip</b>	<b>Messsignal</b>
Zugkraftsensor	Kraft (0-10 kN)	Dehnungsmessstreifen (Widerstandsänderung)	Gleichspannung (0-5 V)
Ultraschall- Abstandssensoren	Längenabstand (50-500 mm)	Signalreflektion (Laufzeitmessung)	Gleichspannung (0-5 V)
Drucksensor	Flüssigkeitsdruck (0-25 MPa)	Dehnungsmessstreifen (Widerstandsänderung)	Gleichspannung (0-5 V)
Peiselrad	Länge (cm)	Pulszählung (2.500/Radumdrehung)	Pulsspannung

**Tab. A. 4: Eckdaten des eingesetzten Penetrometers**

Messlanze (Beprobungstiefe)	700 mm
Konus	Ø 13 mm Spitzwinkel $\alpha$ 30°
Maximale Eindringkraft	1.000 N
Antrieb	12 V DC Elektromotor, Zahnstange
Stromversorgung	2 x 6V Blei-Gelakku
Datenaufzeichnung	PC mit Messprogramm (Zeit, Kraft und Weg)

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn in der Zeit von Oktober 2006 bis August 2009 entstanden.

Ich bedanke mich bei allen, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Büscher für die Überlassung des Themas und die konstruktive, wissenschaftliche Betreuung.

Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Südekum für die Übernahme des Koreferates.

Herrn Prof. Dr. Dehne für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Dr. habil. Andrea Wagner für die vorbereitende Organisation des Projektes und die vielen Anregungen während der Durchführung.

Den Firmen BAG Budissa Agro Service und der RKW AG für die finanzielle Unterstützung des Projektes sowie insbesondere Dr. Udo Weber und Siegfried Meise für die Diskussionsbereitschaft und Unterstützung.

Den AG-BAG Mitarbeitern Maika Schoitissek, André Robel und Stefan Bresan für die tatkräftige Hilfe bei den Außenmessungen.

Herrn Heiner Gebauer für die konstruktive Umsetzung des Versuchsaufbaus.

Den Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik, vor allem unserer Werkstatt, sowie den Mitarbeitern der Lehr- und Forschungsstation Frankenforst für die Mitarbeit und Hilfsbereitschaft.

Herrn Dr. Oliver Schmittmann und Fabian Ross für die Hilfe bei Methodenentwicklung und Versuchsdurchführung.

Meiner Familie und insbesondere meiner Frau für die vielfältige und ausdauernde Unterstützung.